

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА
ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи



Голубцов Георгий Борисович

**ФОРМИРОВАНИЕ, МОРФОЛОГИЯ И ДИНАМИКА ОСТРОВОВ
ШИРОКОПОЙМЕННЫХ РУСЕЛ БОЛЬШИХ РЕК
(НА ПРИМЕРЕ ОБИ И ЛЕНЫ)**

1.6.14 – геоморфология и палеогеография

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Научный руководитель:
доктор географических наук,
главный научный сотрудник

Чалов Роман Сергеевич

Москва — 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О МОРФОЛОГИИ И ДИНАМИКЕ РЕЧНЫХ ОСТРОВОВ И ИХ РОЛИ В ФОРМИРОВАНИИ И РЕЖИМЕ РУСЛОВЫХ РАЗВЕТВЛЕНИЙ.	9
1.1 Этапы развития учения о русловых процессах, основные подходы к классификации русел рек, место в них разветвлений и речных островов.	9
1.2. Острова как основа формирования разветвленных русел.	18
1.3. Изученность русловых процессов на верхней Оби, средней и нижней Лене.	26
ГЛАВА 2. УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ШИРОКОПОЙМЕННЫХ РУСЕЛ НА ОБИ И ЛЕНЕ.	36
2.1. Общая характеристика бассейнов рек Оби и Лены.	36
2.2. Условия формирования широкопойменного русла р. Оби.	44
2.2.1. Геолого-геоморфологические условия формирования русла верхней Оби.	45
2.2.2. Гидрологический режим участка верхней Оби.	49
2.3. Условия формирования широкопойменного русла р. Лены.	56
2.3.1. Геолого-геоморфологические условия формирования русла Лены.	56
2.3.2. Гидрологический режим средней и нижней Лены.	61
ГЛАВА 3. МОРФОДИНАМИЧЕСКИЕ ТИПЫ РАЗВЕТВЛЕННЫХ РУСЕЛ: УСЛОВИЯ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ, МОРФОМЕТРИЯ, ГИДРОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ДИНАМИКА.	73
3.1. Принципы классификации русловых разветвлений; место разветвленных русел в морфодинамической классификации русел МГУ.	73
3.2. Разветвленное русло верхней Оби (характеристика разветвлений, динамика островов и их морфометрические параметры).	80
3.3. Разветвленное русло средней и нижней Лены (характеристика разветвлений, динамика островов и их морфометрические параметры).	92
ГЛАВА 4. ОСТРОВА КАК ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ РАЗВЕТВЛЕНИЙ.	128
4.1. Формирование осередков и переход от осередкового структурного уровня разветвленности к русловому (островному).	128
4.1.1 Формирование элементарных островов и их дальнейшее развитие	128
4.1.2. Особенности развития островов и их влияние на русловые перестроения.	137
4.2 Морфометрические характеристики островов, их связь с устойчивостью русел и их морфодинамическим типом (гидролого-морфологический анализ).	139
4.2.1. Особенности применения гидролого-морфологического анализа к разветвленным руслам.	140
4.2.2. Гидролого-морфологические зависимости.	141
4.3. Динамика островов в широкопойменных руслах больших рек.	160

ГЛАВА 5. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ МОРФОДИНАМИКИ ОСТРОВОВ В ШИРОКОПОЙМЕННЫХ РУСЛАХ БОЛЬШИХ РЕК.	169
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	185
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	188

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования. Русловые разветвления являются самыми сложными среди всех морфодинамических типов русла, отличаясь чрезвычайно сложной морфологией, большим разнообразием размеров и морфометрических характеристик формирующих их островов, рукавов и протоков, активными русловыми деформациями. Русловые разветвления определяют рассредоточение и перераспределение стока воды и наносов по рукавам и протокам, переформирования как рукавов, так и узлов разветвления в целом, изменения размеров и формы островов, их объединение, увеличение размеров и размыв. В условиях свободного развития русловых деформаций они отличаются особенно большим разнообразием и интенсивностью переформирований.

В последние десятилетия все большее внимание при изучении русловых процессов уделяется большим и крупнейшим рекам, имеющим русла, разветвленные на рукава. Однако исследования в основном сосредотачиваются на выявлении режима деформаций разветвлений, их типизации, рассредоточении стока и обосновании методов регулирования при освоении речных ресурсов (труды Н.И. Маккавеева, Ф.М. Чернышова, Р.С. Чалова, К.М. Берковича и др.). В то же время создающие разветвления острова, как важнейший морфологический элемент разветвленного русла, рассматриваются лишь в контексте переформирований, тогда как их морфология, морфометрические характеристики, динамика и временная трансформация, эволюция, связь с водностью и параметрами русел рек, устойчивостью и морфодинамическим типом самих разветвлений обычно остаются вне поля зрения исследователей. При этом имеющиеся результаты исследований и гидролого-морфологическая оценка разветвлений и главным образом островов на больших и крупнейших реках в основном относятся к отдельным морфологически однородным участкам и не характеризуют разветвления на всем или большем протяжении широкопойменных русел. Кроме того, формирование русел больших и крупнейших рек, в частности Оби и Лены, происходит при существенных различиях физико-географических и гидрологических (водоносности) факторов (при относительной однородности песчаных и суглинистых отложений, слагающих широкие долины и определяющих свободные условия развития русловых деформаций); поэтому они отличаются морфологическим многообразием островов и режима переформирований, связанных с ними разветвлений, специфическими проявлениями морфодинамики и морфометрии островов.

Объекты исследования — участки сложноразветвленного широкопойменного русла больших и крупнейших рек России — верхней Оби (от слияния Бии и Катунь до устья р. Томи), средней и нижней Лены в пределах Центрально-Якутской низменности (от

г. Покровска до с. Жиганск на полярном круге) протяженностью 190 км Обь и 860 км Лена, изменяющие свои морфологические, морфометрические и гидрологические характеристики по длине. Для обеих рек характерно абсолютное преобладание разветвленного русла при разнообразии их разновидностей.

Цель исследования — гидролого-морфологический анализ островов широкопойменных русел рек верхней Оби, средней и нижней Лены, выявление особенностей их морфометрии, динамики, эволюции в зависимости от морфодинамического типа разветвленного русла, его параметров и водности, что обеспечит углубление знаний о географии русловых процессов в отношении русел рек, разветвленных на рукава, их морфодинамики и гидроморфологии. Достижение цели связано с решением следующих **задач**:

- Обобщить материалы ранее выполненных исследований широкопойменных разветвленных русел больших и крупнейших рек;
- Выполнить анализ распространения морфодинамических типов разветвленных русел, условия их развития и их связи с размерами и морфологией островов, обосновать показатели, характеризующие морфометрию, морфологию и динамику разветвлений, параметры островов и т.д.;
- Выявить связи между параметрами русла и островов, их зависимость от геоморфологических, гидрологических и других природных факторов русловых процессов;
- Разработать морфолого-морфометрическую классификацию островов с учетом стадий их развития и динамики;
- Определить основные схемы развития островов как основного элемента прогнозных оценок переформирования разветвленного русла;
- Оценить возможные изменения разветвлений и островов в будущем при сохраняющихся тенденциях переформирования русла, в том числе под влиянием изменений природных и антропогенных факторов.

Защищаемые положения.

1. Свободные условия развития русловых деформаций, широкопойменный геоморфологический тип русел, слабая устойчивость русла обуславливают образование многочисленных островов, рассредоточение стока и формирование разветвлений разного типа.

2. Морфометрические параметры островов и степень разветвленности русла определяются морфодинамическим типом разветвлений, рассредоточенностью стока и

формированием островов в активной или периферической частях русла, в основных или второстепенных рукавах разветвленного русла.

3. Определены основные стадии развития островов, каждая из которых может быть в зависимости от местных условий завершающей (осередок → элементарный → малый → средний → большой остров → островной массив) и их причины: зарастание осередков и отмелей, объединение островов.

4. Обе реки, несмотря на различия в размерах и физико-географических условиях формирования имеют одинаковые морфодинамические типы русла и характеризуются едиными гидролого-морфологическими зависимостями (с учетом разницы в водности рек).

Научная новизна. Речные острова при огромном разнообразии их форм, размеров, условий образования слабо освещены в литературе по русловым процессам и морфологии речных русел. В работе: 1) впервые дан детальный сравнительный анализ двух протяженных участков широкопойменного неустойчивого или слабоустойчивого разветвленного русла большой (Обь) и крупнейшей (Лена) рек; 2) выявлено сходство и различие в условиях формирования и морфологии островов, установлено влияние размеров (водности) реки и степени устойчивости (при вариации ее показателей) русла на их формирование, морфометрические характеристики и количество в зависимости от ширины русла и положения островов в активной и периферических его зонах; 3) обоснована морфолого-морфометрическая классификация островов, связанная с этапами их формирования и эволюции; 4) определены и систематизированы закономерности горизонтальных русловых деформаций при формировании островов разного типа и в разных частях русла.

Фактический материал. Основными материалами, положенными в основу диссертации, являются результаты русловых экспедиционных исследований, выполненных научно-исследовательской лабораторией эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева МГУ имени М.В. Ломоносова, планы русел, составляемые изыскательскими партиями Барнаульского (Обь) и Якутского (Лена) районов водных путей и судоходства, лоцманские и разномасштабные топографические карты разных лет издания, космические снимки. Автор принимал непосредственное участие в полевых работах и натурных исследованиях на Оби (от слияния Бии и Катунь до г. Барнаула в 2016 г, район г. Колпашево в 2021 г.) и на средней и нижней Лене (от п. Мохсоголлох до устья Алдана в 2017–2018 гг. и 2021 г. и ниже устья р. Алдан в 2021 г.). Использовались отчеты экспедиций лаборатории, архивные и современные данные по морфологии днищ долин, уклонам, крупности современного аллювия (руслообразующих наносов, определяющих

устойчивость русла), скорости потока, рассредоточению стока воды в разветвлениях русла.

Методы исследования. Исследования выполнены с использованием метода гидролого-морфологического анализа речных русел, примененного для установления зависимостей параметров островов от определяющих факторов, морфометрических и морфологических характеристик русла. Данные о параметрах русла и островов и их изменениях получены по разновременным космическим снимкам, лоцманским картам (картам рек) разных лет издания, а также на основе полевых работ, проведенных в 2016–2021 гг. Натурные исследования выполнялись с использованием современной аппаратуры: акустических доплеровских профилографов (ADCP), систем спутникового позиционирования, эхолотов, турбидиметров (приборов для измерения мутности) и пр. Динамика островов и разветвлений оценивалась на основе ретроспективного руслового анализа с использованием карт и снимков русла за период с 1960-х по 2021 г.

Практическая значимость. Анализ морфологии и морфометрии островов как основных элементов разветвлений речных русел, их эволюции и гидролого-морфологических соотношений и связей с определяющими факторами русловых процессов позволяет получить представление о современном состоянии разветвлений и дать основу для прогнозных оценок русловых переформирований, выявить общие закономерности формирования и развития островов и связанных с ними разветвлений, влияние на них местных условий, степени устойчивости русла и пр. Установленные зависимости, морфометрические и динамические характеристики островов в руслах с различными типами разветвлений должны учитываться при решении задач, связанных с водохозяйственным и водотранспортным использованием рек как в настоящее время, так и при перспективных планах с учетом прогнозных оценок переформирований русел, в первую очередь для обеспечения на реках оптимальных судоходных условий.

Апробация работы. Основные результаты работы были доложены на научном семинаре научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им Н.И. Маккавеева (МГУ, 16 мая 2022 г.), на ежегодных научных конференциях «Маккавеевские чтения» (МГУ, 2019, 2021 гг.), на XXXV (Курск, октябрь 2020 г.), XXXVI (Ижевск, октябрь 2021 г.) и XXXVII (Рязань, октябрь 2022 г.) пленарных межвузовских научно-координационных совещаниях по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов; XXIX (г. Чебоксары, май 2018 г.) и XXX (г. Набережные Челны, апрель 2022 г.) семинарах молодых ученых вузов, объединяемых Межвузовским научно-координационным советом по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов, на Международной научно-практической конференции «Гришанинские чтения: Водные пути

и русловые процессы. Гидротехнические сооружения на водных путях» (г. Санкт-Петербург, 2–5 июня 2021 г.).

Результаты диссертационного исследования нашли отражение в научных отчетах, выполненных по проектам РФФИ «Разветвления русел равнинных рек (много рукавные русла): гидролого-морфодинамический анализ, гидрологические функции, временная трансформация, методы управления для обеспечения гидроэкологической безопасности» (№№ 18-17-00086 и 18-17-00086 П), а также по хоздоговорам и госконтрактам с Росморречфлотом и Администрациями Ленского и Обского бассейнов внутренних водных путей и судоходства.

Публикации. По результатам исследования подготовлено 13 публикаций, в том числе 4 статьи в научных журналах, включенных в перечень российских рецензируемых журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций, 5 статей в прочих журналах и 4 тезисов докладов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 200 страниц, содержит 79 рисунков и 36 таблиц. Список литературы состоит из 149 наименований, из них 23 на иностранном языке, а также более чем 15 архивных материалов (научно-технических отчетов и лоцманских карт).

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность своему научному руководителю — профессору, доктору географических наук Р.С. Чалову за всестороннюю помощь в проведении исследований и подготовке диссертации на всех этапах, сотрудникам научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, в первую очередь в.н.с., к.г.н. А.С. Завадскому, с.н.с., к.г.н. С.Н. Рулевой, д.г.н., в.н.с. К.М. Берковичу, м.н.с. П.П. Головлеву, а также доценту кафедры гидрологии суши д.г.н. С.Р. Чалову за консультации, в том числе при проведении экспедиционных исследований, предоставление фондовых и архивных материалов, Администрациям Ленского и Обского бассейнов внутренних водных путей, предоставившим техническую возможность проведения исследований, а также руководству Барнаульского района водных путей и судоходства и работникам его изыскательской партии, в которой автор работал в навигацию 2016 г.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О МОРФОЛОГИИ И ДИНАМИКЕ РЕЧНЫХ ОСТРОВОВ И ИХ РОЛИ В ФОРМИРОВАНИИ И РЕЖИМЕ РУСЛОВЫХ РАЗВЕТВЛЕНИЙ.

1.1 Этапы развития учения о русловых процессах, основные подходы к классификации русел рек, место в них разветвлений и речных островов.

Речные русла используются человеком для осуществления его хозяйственной деятельности с глубокой древности. Первые сведения о речных руслах и их использовании относятся к литературным источникам Древнего Китая. Еще в конце 1-го тысячелетия до н.э. встречаются описания нестабильного положения речных русел (их «блуждания»), формирования островов и изменения их очертаний с течением времени, а также приводятся описания методов укрепления берегов и регулирования стока для защиты от наводнений.

Постепенное развитие торговли, строительство новых населенных пунктов и интенсификация сельского хозяйства способствовали тому, что в средние века многие известные деятели науки предпринимали попытки к обоснованию мер, направленных на улучшение судоходства, а также снижения риска затоплений многочисленных поселений, расположенных вдоль рек. Позднее Г. Галилей (в начале XVII в.) одним из первых с научной точки зрения обосновал проект спрямления излучин р. Тибр для снижения уровня затопления во время половодья и паводков. Отдельные упоминания об искусственных спрямлениях излучин и создании канализированных русел, в том числе и на территории современной России, относятся и к более раннему периоду (XI–XIV вв.) [Чалов, 2008].

Изучение русел с точки зрения расположения в них перекатов (мелководий), островов и рукавов началось в связи с интенсивным использованием рек в качестве водных путей сообщения. В период XVI–XVII вв. были проведены первые батиметрические съемки русла р. Волги, составлены приблизительные планы отдельных его участков вблизи крупных населенных пунктов. Рост городов и соответствующее ему увеличение потребностей населения привело к созданию каналов, строительству речных портов, необходимости бесперебойного обеспечения судоходства. Поэтому начиная с периода правления Петра I (рубеж XVII–XVIII вв.) появляются первые труды, посвященные описаниям русел рек России, скоростям их деформаций.

С начала XIX в. начинаются систематические съемки участков русла, нанесение контуров островов, измерение скоростей течения, а иногда и учет изменения уровня воды и построение поперечных и продольных профилей в некоторых створах. Первым изданием, содержащим в себе такую информацию, стал выпущенный в 1861 г. первый

атлас р. Волги. В 1854 г. в издании «Судоходный дорожник Европейской России» были представлены сведения о руслах рек, описано их состояние — наличие островов, перекаты и т.д. В 1875 г. были созданы специальные навигационно-описные комиссии при Министерстве путей сообщения, в задачи которых входило проведение детального изучения многих судоходных рек. В результате таких изыскательских работ было опубликовано около 30 атласов рек и более 60 выпусков «Материалов для описания русских рек и истории улучшения их судоходных условий», а также многочисленные лоцманские карты и пояснительные записки к ним.

В конце XIX в. публикуются первые обобщающие работы о руслах отдельных крупных рек и их переформированиях: В.М. Лохтина — по Днестру и Чусовой, В.И. Рагозина и Н.А. Богуславского — по Волге, Н.С. Лелявского — по Днепру и Припяти, Н. П. Пузыревского — по Дону. В их исследованиях впервые был дан русловой анализ участков рек на основе накопленных к этому времени знаний. Важными были в то время проводившиеся совещания и конгрессы по судоходству. Рубеж XIX–XX вв. ознаменовался выходом работ, которые являются первыми научными трудами по теории русловых процессов — монографий В.М. Лохтина «О механизме речного русла» [1897] и Н.С. Лелявского «О речных течениях и формировании речного русла» [1893]. В работах последнего опровергались упрощенные представления о движении речного потока, что подтверждалось многочисленными инструментальными наблюдениями, выполненными как с помощью поверхностных поплавков, так и с помощью сконструированного и предложенного автором прибора — «измерителя речных струй», созданного для проведения наблюдений в глубинных слоях [Проскуряков, 1951]. Прибор позволял регистрировать направление струй как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях, с его помощью было проведено около 1700 измерений (рис.1.1). Тогда же, в конце XIX в., были предприняты первые попытки классификации и систематизации форм русла: главным образом были выделены свободные и врезанные излуины, однако структурированной классификации разветвленных русел не существовало — они только упоминались.

30-е годы XX века ознаменовались развитием лабораторного моделирования русловых процессов, изучения пространственного характера течений в русле. А.И. Лосиевский [1934] впервые показал, что разделение потока на несколько ветвей течения со своими особенностями поперечной циркуляции приводит к образованию разветвлений русла и островов. Это позволило уже к концу 1940-х годов создать основы гидродинамического направления в изучении русловых процессов. С этим направлением связаны имена крупных исследователей — М.А. Великанова, В.Н. Гончарова, К.В.

Гришанина. С развитием гидротехнического строительства, которое активно началось в годы первых пятилеток, большое внимание стало уделяться прогнозированию русловых деформаций в условиях антропогенного воздействия на русло: пионерными в этом отношении были работы Б.В. Полякова. В 1931 г. им же была предложена конструкция прибора для исследования донных речных наносов.

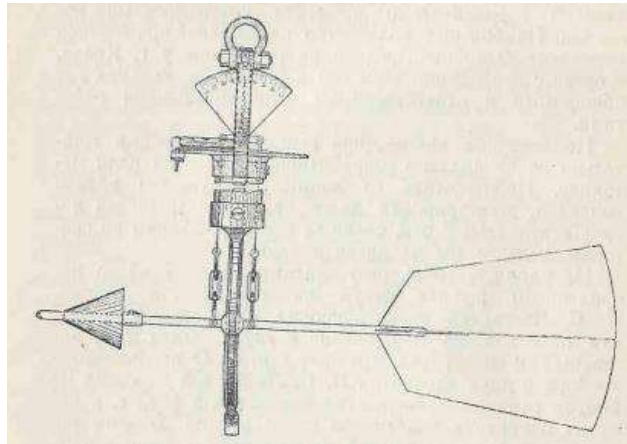


Рисунок. 1.1 — Измеритель речных струй системы Н.С. Лелявского, 1-й вариант [Проскуряков, 1951].

В 30-е же годы появились труды, обобщающие знания о генезисе и морфологии речных пойм, что было важно прежде всего с точки зрения их сельскохозяйственного освоения. основополагающей работой в этой области стал труд Р.А. Еленевского «Вопросы изучения и освоения пойм» [1936]. Многие элементы предложенной им классификации пойм сохраняют свою актуальность в настоящее время. В частности, он отметил формирование рельефа поймы благодаря объединению островов и их причленению к берегам.

К середине XX века формируется несколько подходов к классификации русловых процессов и, соответственно, форм русла. Были предложены показатели степени устойчивости, ее влияние на морфологию и динамику русла и его параметры. Несколько позже получило развитие направление, связанное с грядовым движением наносов и грядовых форм русла, характеризовались руслообразующие наносы, их тип и форма транспорта. [Знаменская, 1968]

Н.И. Маккавеев [1955] одним из первых выделил типы русел, разветвленных на рукава, предложил термины для водотоков, образующих разветвления, определил механизмы формирования и роль осередков и островов как основных форм руслового рельефа. Согласно Н.И. Маккавееву, первый тип — разветвления, длина которых близка к длине изгиба меженного русла реки, образованные протоками и осередками. Ко второму типу относились разветвления, длина которых сопоставима с длиной изгиба в половодье;

в таком случае входящие в его состав элементы получили название острова и собственно рукава, а затопление таких островов происходит только в период высокого половодья. Третий тип по имеющимся представлениям был образован «почти самостоятельными реками», обладал значительной длиной, и каждый из рукавов в таком случае имел собственный русловой режим, что являлось аналогией современным представлениям о раздвоенных руслах.

Многообразие русел позволяет классифицировать их не только по внешнему облику, но и по их возможным изменениям в процессе эволюции. Первая классификация речных русел была предложена К.И. Россинским и И.А. Кузьминым [1947] (более поздний вариант [1958]), выделившими прямолинейные, извилистые и разбросанные русла (этим термином авторы называли разветвленные русла), каждые из которых характеризовались определенной динамикой и структурой потока, особенностями деформаций и русловых форм и т.д., обусловленных гидродинамическими и геолого-геоморфологическими факторами. Позднее были разработаны классификации И.Ф. Карасева [1975], Н.А. Ржаницына [1985], в которых впервые были учтены не только горизонтальные, но и вертикальные русловые деформации. Из всех предложенных наибольшее распространение получили классификации Государственного Гидрологического института (ГГИ) — «типизация руслового процесса» и морфодинамическая классификация речных русел МГУ имени М.В. Ломоносова (далее — классификация МГУ). В классификации ГГИ применен несколько иной подход, не соответствующий выделению трех основных типов русла. Она основана на работах Н.Е. Кондратьева и И.В. Попова [Кондратьев, Попов, Сنيщенко, 1982], согласно которым типы русла выделяются в последовательности, отвечающей увеличению транспортирующей способности потока (рис. 1.2). Основное внимание уделяется извилистости (меандрированию) потока; прямолинейные русла рассматриваются в контексте первых двух типов (ленточногрядовый и побочневый типы); русловые разветвления представлены всего двумя типами: осередковой и пойменной многорукавностью. Широкое распространение, в т.ч в проектно-изыскательской практике, классификация ГГИ получила в связи с включением ее в нормативные документы.

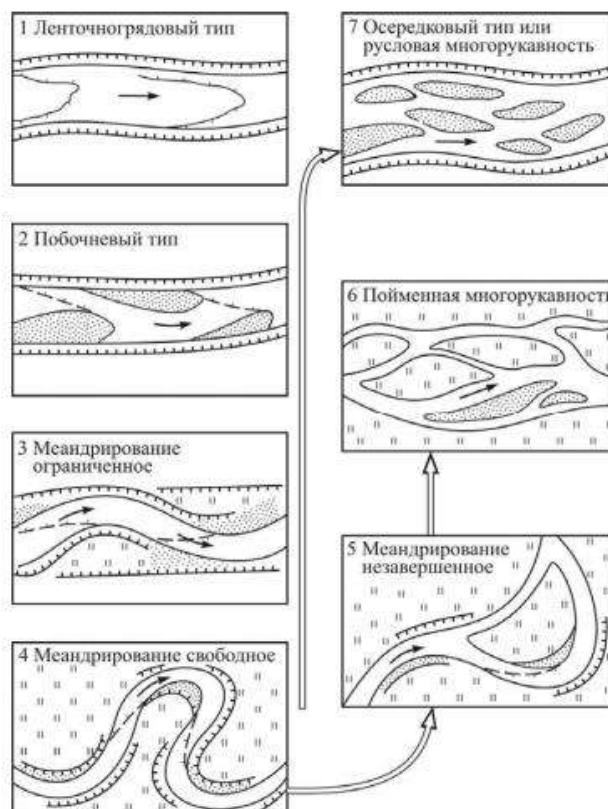


Рисунок 1.2 — Типизация руслового процесса ГГИ (направление стрелок соответствует изменению транспортирующей способности потока) [Кондратьев и др., 1982].

В конце 1970-х гг. получил дальнейшее развитие подход Н.И. Маккавеева, К.И. Россинского и И.А. Кузьмина, но связывающий между собой характеристику формы русла (его морфологию) и их переформирования (деформации) во времени (динамику). Тогда же впервые было обосновано понятие о **морфодинамических типах русла** и предложен соответствующий термин [Чалов, 1979]. Разработанная классификация МГУ в настоящее время является одной из самых подробных. Она учитывает многообразие проявлений меандрирования, разветвлений русла, условия и закономерности их переформирований.

Основа для создания морфодинамической классификации русел МГУ была заложена Н.И. Маккавеевым [1955], который принимал извилистость русла как наиболее своеобразную морфологическую особенность равнинных и полугорных рек. В свою очередь, немеандрирующие русла разделяются на прямолинейные (неразветвленные) и разветвленные рукава [Маккавеев, 1955, 1971]. В основу классификации МГУ, неоднократно уточняющуюся в более поздних публикациях [Маккавеев, Чалов, 1986; Чалов, 1997, 2008, 2011] положен многоуровневый принцип (рис. 1.3), позволяющий в последовательности взаимосвязанных структурных блоков отразить особенности

взаимодействия потока и русла, определяющие различия в механизме русловых процессов и форме транспорта наносов на горных, полугорных и равнинных реках, геолого-геоморфологические условия формирования русел, проявляющиеся в свободном или ограниченном развитии русловых деформаций и выделении широкопойменных, врезанных и адаптированных русел, и, наконец, собственно морфодинамических типов русел — меандрирующих (извилистых), разветвленных на рукава и относительно прямолинейных, неразветвленных, каждый из которых состоит из большего или меньшего количества подтипов (в частности, разветвленные широкопойменные русла имеют 11 разновидностей, каждая из которых характеризуется своими морфологическими особенностями, структурой потока и режимом деформаций). Дополнительные блоки связаны с показателями, определяющими особенности развития каждого морфодинамического типа русла (устойчивости, крупности руслообразующих наносов, антропогенных воздействий).

В настоящее время в отечественной русловедческой литературе эта классификация получает все большее распространение, что находит подтверждение в многочисленных публикациях. По мере расширения знаний о русловых процессах на реках эта классификация позволяет дополнять ее новыми структурными ячейками, уточнять и совершенствовать [Чалов, 2008]. В частности, в первых вариантах этой классификации [1979] не было пойменно-русловых, параллельно-рукавных разветвлений и раздвоенных русел. Они были включены в классификационную схему в результате детальных исследований этих русел на больших и крупнейших реках России [Чалов, 1996; Чалов, Беркович и др., 2020].

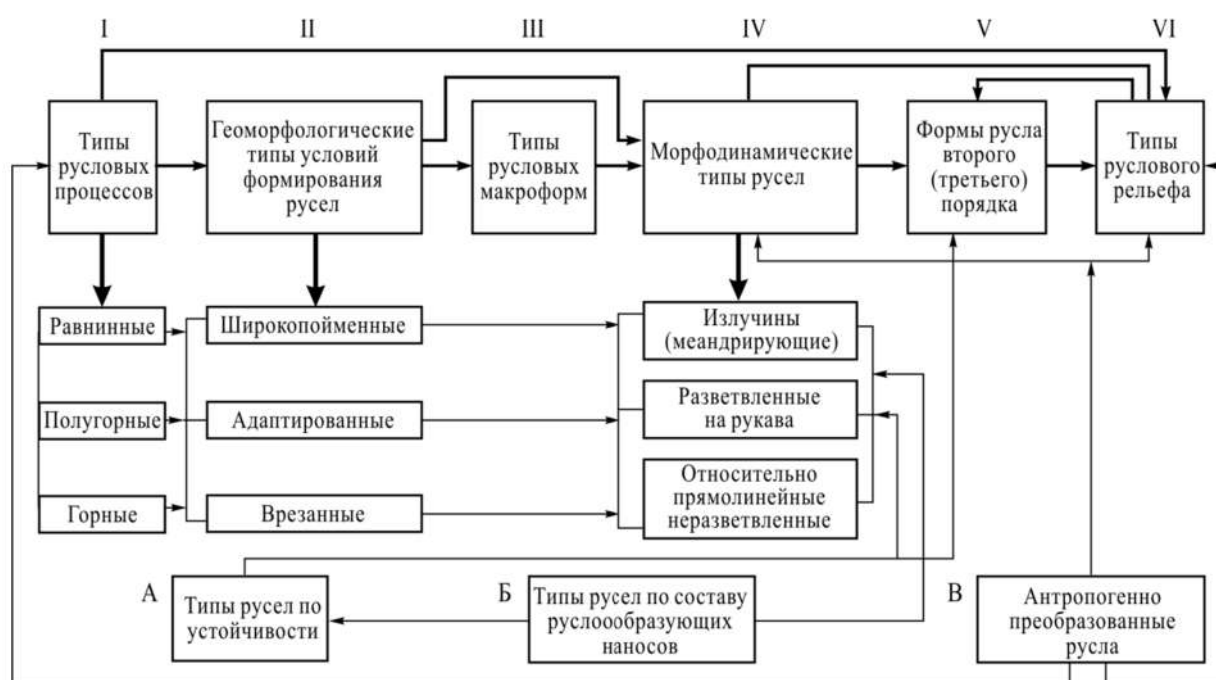


Рисунок 1.3 — Структура морфодинамической классификации речных русел МГУ
(I–VI — основные блоки; А, Б, В — дополнительные блоки) [Чалов, 2008].

Согласно этой классификации наибольшим многообразием типов отличаются широкопойменные, разветвленные на рукава русла (рис. 1.4). Среди них можно выделить как простые разветвления (простое одиночное и одностороннее), так и сложные (сложное одиночное, сопряженное, параллельно-рукавное, чередующееся одностороннее, пойменно-русловое, собственно разбросанное). Простые разветвления являются элементом более сложных видов разветвлений (например, для параллельно-рукавных разветвлений нередко характерны вторичные разветвления, приводящие к разделению основных рукавов на протоки). Среди русел рек, разветвленных на рукава, особое место занимает пойменная многорукавность, которая встречается как на меандрирующих, так и на разветвленных реках, будучи связанной с прохождением руслоформирующих расходов воды в условиях затопленной поймы, в результате чего отшнуровавшиеся в ходе переформирования русла рукава и староречья при спрямлении излучин не отмирают, превращаясь в ложбины и озера на пойме, а сохраняются в виде маловодных пойменных проток, расчленяющих пойму на отдельные массивы [Чалов, 1997]. В данной классификации учитываются также формы 2-го и 3-го порядка, осложняющие морфологию русла и способствующие перераспределению стока.

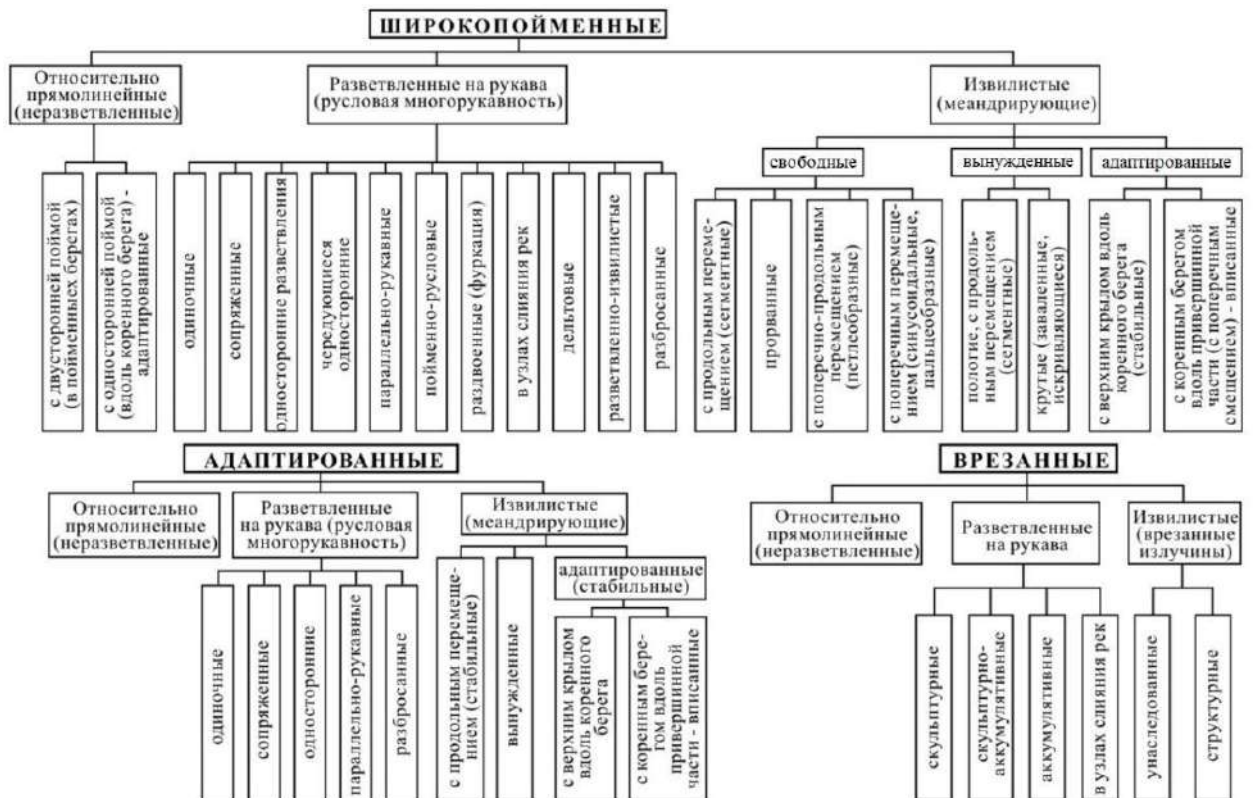


Рисунок 1.4 — Морфодинамические типы русел равнинных рек и их разновидности (блок IV) [Чалов, 2008].

В настоящее время дальнейшее развитие морфодинамическая классификация МГУ получила в связи с теоретическим обоснованием структурных уровней развития разветвлений [Чалов, С. Чалов, 2020], которые развиваются на уровне грядовых форм руслового рельефа (осередковые разветвления), форм разветвленного русла — русловых (островных) разветвлений, пойменно-русловых разветвлений и раздвоенных русел. При этом каждому уровню разветвлений соответствуют формирующие их в зависимости от типа осередки, острова или пойменные массивы. Так, например, островным массивам соответствуют пойменно-русловые разветвления, пойменным массивам — пойменная многорукавность, раздвоенные русла разделены обширными участками поймы — межукавьями [Смирнова, 2002].

Зарубежными учеными первые классификации русел рек предлагались еще в конце XIX века, когда было рекомендовано различать русла рек в аллювиальных (пойменных) и коренных берегах [Gilbert, 1877, 1914], что в современном русловедении может являться аналогией широкопойменного и врезанного русел соответственно. Классификации, подразумевающие разделение русел на три группы (прямолинейные, меандрирующие и разветвленные) была предложена американцами в 1957 г. [Leopold, Wolman, 1957] практически одновременно с К.И. Россинским и И.А. Кузьминым в СССР. Этот же принцип составляет основу классификации С. Шумма [Schumm, 1972, 1981, 1985]. Он, помимо трех главных типов русла, включил в классификацию характеристики формы транспорта наносов и степени устойчивости, ранжируя их в порядке от наиболее устойчивого прямолинейного русла с преобладанием доли взвешенных наносов к неустойчивому многорукавному руслу с повышенной долей стока влекомых наносов (рис. 1.5).

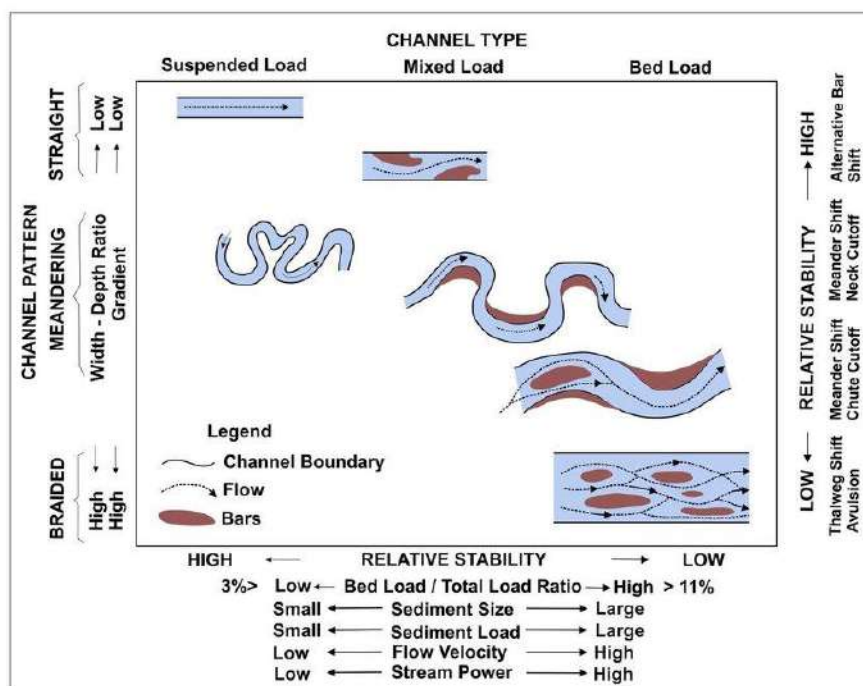


Рисунок 1.5 — Классификация речных русел по [Schumm, 1981].

Более полные поздние классификации были выполнены с применением иного подхода. Rosgen [1994] в своих работах основывался прежде всего на таких морфометрических показателях, как соотношение ширины поймы к ширине русла — $B_{\text{п}}/b_{\text{р}}$, уклон водной поверхности, степень извилистости l/L , форма поперечного сечения ($b_{\text{р}}/h$), крупность руслообразующих наносов. По перечисленным признакам выделено 8 главных типов и несколько десятков подтипов русел.

Начиная с конца 1990-х годов зарубежными исследователями был предложен ряд классификационных схем, существенно изменивших, подобно отечественным работам, представления о разнообразии морфодинамических типов разветвленных русел и их географическом распространении. Впервые в зарубежной литературе были выделены и обоснованы русловая и пойменная многорукавность (соответственно “anabranching” и “anastomosing” в англоязычной терминологии) [Knighton, 1998; Carling et al., 2013], выявлены их морфодинамические отличия от разветвленности, соответствующей уровню форм руслового рельефа (“braided channel”) — осередковой. Показано, что многорукавные русла (“anabranching channels”) доминируют на всех крупнейших реках (с расходом воды в среднем более $16\,000\text{ м}^3/\text{с}$) за исключением Миссисипи, а на реках России — за исключением средней Оби и нижнего Иртыша.

Помимо классификаций во второй половине XX века публикуется множество статей и монографий, посвященных особенностям русловых переформирований на отдельных реках, а также проводится обобщение региональных данных о русловых процессах на реках бывшего СССР. Результатом многолетних исследований являются

карты «Русловые процессы на реках СССР» [1990], «Морфология и динамика русел рек Европейской России и сопредельных областей» [1999], на которых нашли отражение различные типы русла, в т.ч. разветвленные на рукава. В 2008, 2011 и 2019 гг. вышли три тома монографии Р.С. Чалова «Русловедение: теория, география, практика», в которых наиболее полно изложено современное состояние этой отрасли знаний, изложены понятия и причины формирования разветвлений, их морфология и типизация, многолетние переформирования и трансформация, роль в перераспределении стока воды и наносов, их географическое распространение, дается классификация рукавов и проток. Однако сами острова рассмотрены исключительно в контексте функционирования разветвлений.

Появление в середине 1990-х гг. компьютерного подхода к обработке данных дало возможность для повышения точности и эффективности результатов всего комплекса русловых исследований, построения карт и гидродинамических моделей, что особенно важно для прогноза и расчета деформаций русел, в том числе в условиях антропогенной нагрузки, в частности, при проведении капитальных дноуглубительных и выправительных работ на судоходных реках, строительстве и проектировании мостовых переходов, трубопроводов и иных инженерных объектов, а также для прогнозирования русловых деформаций в ходе естественного развития речных русел. При этом все большее внимание уделяется руслам больших и крупнейших рек, разветвленных на рукава, в связи с их наибольшей сложностью и многообразием типов. Разветвления рассматриваются как с точки зрения морфологии и динамики, так и рассредоточения стока воды и наносов, однако проблема формирования островов, их эволюция как важнейших элементов русловой многорукавности остается, как правило, вне сферы внимания исследователей.

1.2. Острова как основа формирования разветвленных русел.

Причины формирования и общий вид русловых разветвлений.

Разветвленные на рукава русла рек, наряду с прямолинейными и извилистыми руслами, являются одним из трех основных морфодинамических типов русла [Россинский, Кузьмин, 1947; Маккавеев, 1955; Чалов, 2011], наиболее характерным для больших и крупнейших рек с широкопойменным руслом. Только русловые (островные) разветвления на некоторых крупных реках (например, на верхней Оби, средней и нижней Лене) занимают до 70 % и более от их общей протяженности русла, а с учетом пойменно-русловых разветвлений, пойменной многорукавности, разветвлений 2–3-го порядков доля может возрастать до 85–90 %. Разветвления русел, будучи связанными с формированием в них островов, определяют рассредоточение стока воды и наносов, постоянную изменчивость гидравлических и морфометрических характеристик потока и русла

[Алексеевский, С. Чалов, 2009] и, в обратной связи, являются причиной и условием дальнейших усложнений морфологии русла и русловых деформаций. В этом проявляется один из общих законов русловых процессов М.А. Великанова — Н.И. Маккавеева — единство системы «поток-русло», который М.А. Великановым [1958] сформулирован следующим образом: «...поток управляет руслом, а русло управляет потоком».

Важнейшим элементом русел рек, разделенных на рукава, являются речные острова. Однако разветвлением можно считать любое разделение потока на ветви течения, особенно в межень, когда они бывают связаны с крупными обломками горных пород (на горных реках), отдельными крупными валунами и глыбами на реках с галечно-валунным составом руслообразующих наносов (точечные разветвления [С. Чалов, 2007]) или осередками как обсохшими в межень частями гряд-макроформ руслового рельефа (осередковые разветвления).

Русловые (островные) разветвления, в отличие от точечных и осередковых, проявляются во все фазы водного режима, вызывая разделение потока на ветви течения и другие последствия в динамике потока даже при полностью затопленном острове. Причины и условия возникновения островов как аккумулятивных образований к настоящему времени получили достаточно полное научное объяснение, связанное с внутренней гидравлической неустойчивостью потока и образованием крупных грядовых форм руслового рельефа — макроформ — при большом стоке руслообразующих наносов. М.А. Великанов [1958] писал, что важнейшей причиной формирования разветвленного русла является большая водоносность реки, вследствие чего большие реки разделяются на рукава и протоки. В результате нарушения «гидравлической квазиоднородности» потока при определенном соотношении ширины и глубины русла в нем формируется несколько динамических осей. Согласно критерию И.Ф. Карасева [1975] $\Theta = \frac{b_p}{h} \sqrt{\lambda}$ (здесь b_p — ширина, h — глубина русла, λ — коэффициент гидравлических сопротивлений, C — коэффициент Шези), полученному теоретически и получившему подтверждение в лабораторных условиях, при его значении больше 9,5 поток приобретает неустойчивость и разбивается на отдельные — две и более — ветви течения, что создает предпосылки для формирования разветвлений. Однако для реальных больших и крупнейших рек [Кузьмина, Чалов, 2020; Чалов, Камышев, 2020] значения критерия И.Ф. Карасева на порядок величины больше и составляют для разветвленных русел Лены в зависимости от типа русла от 64 (сопряженные разветвления) до 95, что соответствует параллельно-рукавным разветвлениям — «разбоям» Якутскому и Рассолода. Промежуточные значения

характерны для односторонних ($\Theta=88$), одиночных ($\Theta=80$), и пойменно-русловых ($\Theta=64$) разветвлений.

Отсюда, чем больше водность реки и относительная ширина русла (b_p/h), тем больше вероятность возникновения разветвлений. Наиболее распространено формирование в центральной части русла между ветвями течения осередков, которые, обсыхая в межень и зарастая со временем, превращаются в элементарные острова [Чалов, 1979] — первичную морфологическую форму разветвленного русла.

Формирование скоплений наносов (аллювия) посередине русла может быть связано также с уменьшением транспортирующей способности потока, вызывающей аккумуляцию наносов и расширение русла, возникновением в русле препятствия (скального выступа посередине реки — огрудка — или крупного обломка горных пород), разделяющего поток на ветви течения вне зависимости от его ширины и создающего с обеих сторон и особенно в своей нижней части зоны скоростной тени, в которой идет аккумуляция наносов, а также с резким изменением уклона (например, при выходе реки из предгорий на равнину). Во всех случаях условием образования осередков или других аккумулятивных скоплений аллювия является повышенная доля влекомых наносов в общем стоке наносов.

Осередки эрозионного генезиса формируются вследствие разделения уже существующего осередка на два-три при его затоплении и размыве на нем ложбины, отторжения ветвью течения побочня от берега и образовании побочного протока, отчленения потоком косы в устье острова (отрезанные косы, по Н.И. Маккавееву [1955]) из-за большого поперечного перекаса водной поверхности в рукавах. Среди прочих факторов, способствующих формированию осередков, их превращению в острова и формированию разветвленности русла можно назвать неравномерность внутригодового распределения стока, вследствие чего в разные фазы водного режима стрежень потока блуждает, занимая разные положения, изменение формы транспорта наносов (взвешенные наносы переходят в категорию влекомых), а также местные условия изменения стока воды и наносов: влияние подпоров потока при сужении днища долины, перед слиянием с притоком, выше систематических ледовых заторов льда, заломов и т.д.

По современным представлениям, выделяется пять структурных уровней разветвлений речных русел: точечный, осередковый, русловой (островной), пойменно-русловой и пойменный, переходящие один в другой при определенных условиях в ходе эволюции русловых форм и переформирований русел [Чалов, С. Чалов, 2020]. На *осередковом* уровне поток делится обсыхающими в межень формами руслового рельефа — осередками, но только в межень; при высоких уровнях они составляют часть гряд-макроформ руслового рельефа и подвергаются деформациям как в плане, так и с

поверхности, представляя собой форму транспорта наносов. При *русловом (островном)* уровне разделение потока на ветви течения осуществляется элементарными и крупными островами во все фазы водного режима вследствие растительности и бóльшей высоты, при этом на поверхности островов происходит аккумуляция взвешенных наносов (пойменной фации аллювия), способствуя росту острова в высоту и дальнейшему развитию растительности. *Пойменно-русловые* разветвления занимают промежуточное положение между русловыми (островными) разветвлениями и раздвоенным руслом. Если размеры разделяющего рукава островного массива достаточно велики, то формируется разветвление, в котором каждый рукав имеет свой морфодинамический тип. При этом в таких пойменно-русловых разветвлениях оба рукава могут как меандрировать, так и иметь разветвленные русла. *Пойменному* уровню соответствует формирование раздвоенных русел, пойменной многоруканности и разветвлений в дельтах рек, в которых рукава и протоки разделяются огромными пойменными массивами, за которыми на картах тем не менее сохраняется название «острова», а сами рукава, имеющие очень большую протяженность, нередко именуются реками (на верхней Оби, средней и нижней Лене таковые отсутствуют).

Соотношения между различными структурными уровнями разветвлений (за исключением точечного), а также соответствующих им водотоков и морфологических элементов русла представлены в табл. 1.1.

Таблица 1.1 — Структурные уровни разветвлений речных русел и их морфологические элементы [С. Чалов, 2007; Чалов, С. Чалов, 2020].

Морфологический элемент	Осередок	Элем. остров	Остров*	Островной массив	Расчлененная на отдельные части пойма
Форма разветвления	Осередковая	Островная		Раздвоенное русло	Пойменная многоруканность
		Русловые	Пойменно-русловые		
Водоток	Протока	Протока	Рукав	Ответвление	Пойменная протока

* — Малые, средние и большие острова (по Г.Б. Голубцову и Р.С. Чалову [2019])

Впоследствии [Чалов, С. Чалов, 2020] эта схема была уточнена и дополнена в отношении развития на каждом структурном уровне морфодинамических типов русловых разветвлений (табл. 1.2). Важным является также морфологическое разнообразие разветвлений каждого структурного уровня и особенно русловых (островных)

разветвлений в зависимости от геолого-геоморфологических условий формирования русел, их устойчивости, водности реки и стока наносов, причем всем структурным уровням присущи свои закономерности эволюции, развития, степень влияния и роль в русловом режиме реки. Для русловых (островных) разветвлений, которые отличаются наибольшим многообразием среди остальных уровней и определяют основной вид горизонтальных русловых деформаций, были выделены и описаны основные типы островов в зависимости от их морфометрических параметров: от элементарных до больших и островных массивов [Голубцов, Чалов, 2019].

Таблица 1.2 — Структурные уровни разветвлений и их соотношение с морфодинамическими типами русла [Чалов, С. Чалов, 2020].

Структурный уровень	Морфодинамический тип русла											
	равнинные, полугорные, горные (с развитыми аллювиальными формами) реки										горные реки	
	точечный ¹	осередковый	одиночный	разветвленно-извилистый	одноосторонний	сопряженный	параллельно-рукавный	разбросанный	прорванные излучины	пойменно-русловой	порожисто-водопадный	с неразвитыми аллювиальными формами
Точечный												
Осередковый												
Островной (русловой)												
Пойменно-русловой ²												
Пойменный ²	раздвоенное русло											
	пойменная многорукавность											
	дельтовое											

¹Без разделения на подтип (разновидности).

²Тип русла, соответствующего этим уровням разветвлений, характеризует рукава разветвленного русла.

Также отмечено [Чалов, 2019], что разветвления одного и того же типа неодинаковы по параметрам, положению к стрежневым зонам потока, количеству островов, образующих разветвления, и их деформациям. Детально описаны часто встречающиеся только на больших и крупнейших реках параллельно-рукавные разветвления (впервые этот тип выделен был на верхней Оби С.Н. Рулевой [1988], пойменно-русловые разветвления и раздвоенные [Чалов, Куракова и др., 2022] русла, образующие самостоятельные более высокие структурные уровни. Характерно, что в классификации МГУ они выделены в одном ряду с морфодинамическим типом русла, т.е. сама схема в этом отношении требует совершенствования.

На примере параллельно-рукавных русел показано [Чалов, Беркович и др., 2020] соответствие морфологии русла гидродинамической структуре потока, что стало возможным благодаря применению современной аппаратуры — доплеровских

измерителей течения (рис. 1.6). Примечательно, что при этом скоростное поле потока с двумя ветвями течения и динамическими осями получены для участков рек, где острова только зарождаются и между ними расположены только осередки.

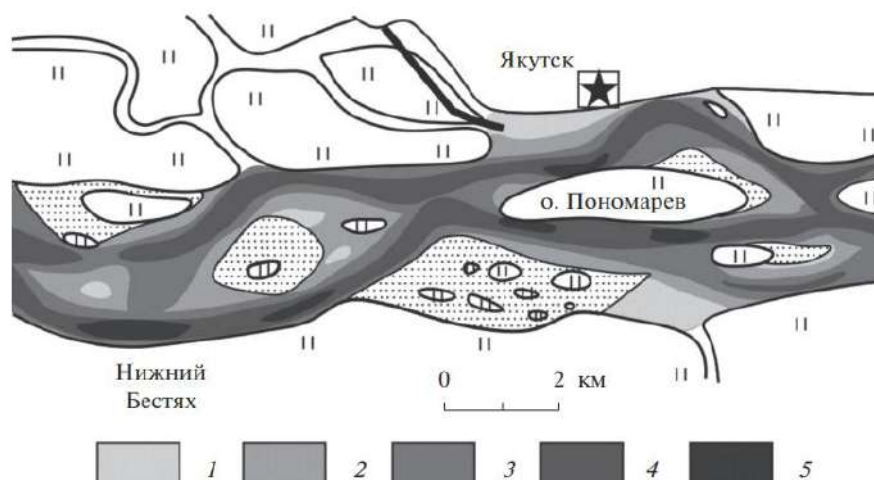


Рисунок 1.6 — Скоростное поле потока (по измерениям 2017 г.) в параллельно-рукавных разветвлениях р. Лены в Якутском водном узле. Скорости течения, м/с: 1 — 0.1–0.4; 2 — 0.4–0.7; 3 — 0.7–1.0; 4 — 1.0–1.3; 5 — 1.3–1.6. [Чалов, Завадский и др., 2019].

Рассредоточение стока воды по рукавам — основная отличительная черта разветвлений. Уже наличие самого разветвления означает уменьшение расхода воды в самом крупном рукаве по сравнению с расходом воды выше узла разветвления [Чалов, 2008], что, в свою очередь, определяет параметры рукавов и их форм, режим их переформирований. В связи с этим для получения гидролого-морфологических характеристик разветвлений была разработана [Чалов, 2011] схема параметризации типичного одиночного разветвления и создающего его острова. В общем случае каждое разветвление русла представлено островом и расположенными по обе стороны от него рукавами, которые завершаются слиянием и восстановлением потока в едином русле (рис. 1.7).

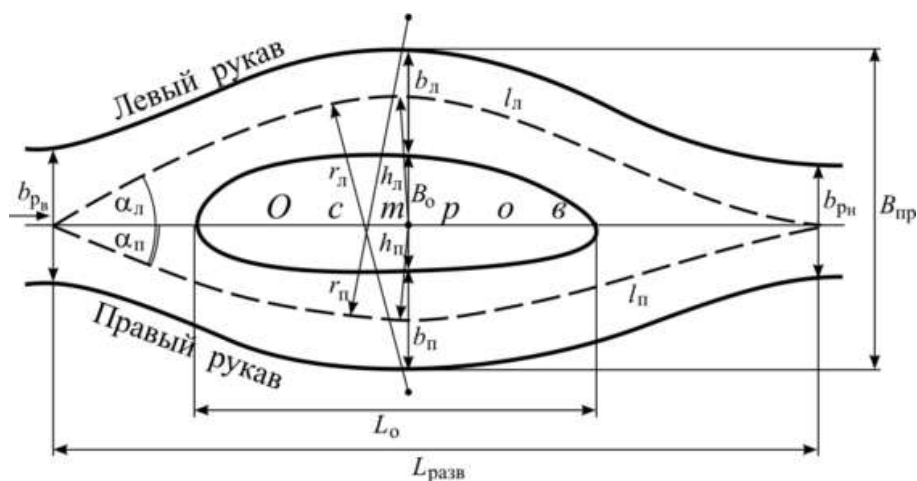


Рисунок 1.7 — Общий вид руслового разветвления и его параметры (B_o — ширина острова, L_o — длина острова, b_l, l_l, b_p, l_p — ширина и длина левого и правого рукавов соответственно, $L_{разв}$ — шаг разветвления, $b_{рв/рн}$ — ширина русла выше/ниже узла разветвления) [Чалов, 2008].

Кроме показателей длины разветвления (его шага) — $L_{разв}$, ширины пояса разветвления — $B_{пр}$, ширины левого и правого рукавов (b_l и b_p соответственно), при характеристике разветвленных русел используется ряд безразмерных параметров: относительная ширина острова (ее отношение к ширине русла перед узлом разветвления B_o/b_p), отношение ширины рукава при руслоформирующем расходе воды к его средней глубине ($b_{рук}/h$), степень разветвленности русла, выраженная количеством островов n_o на единицу длины русла x , коэффициент формы острова (L_o/B_o). Морфологические особенности рукавов характеризуются теми же параметрами, что и излучины русла, поскольку поток и его ветви, огибая острова, образуют излучины рукавов или рукав имеет прямолинейные очертания.

Гидролого-морфологический анализ разветвлений

Одним из основных методов изучения разветвленных русел является их гидролого-морфологический анализ, который проводится как для конкретного участка реки или всего русла реки, так и для нескольких морфологически сложных участков. В последнем случае анализ носит характер сравнительного. Примером проведения гидролого-морфологического анализа является работа Е.А. Львовской [2016], посвященная морфодинамике и гидроморфологии разветвленных русел рек севера ЕТР. Гидролого-морфологический анализ подразумевает анализ распространения морфодинамических типов русла и выявление связи между морфометрическими и морфологическими параметрами русла, с одной стороны, и характеристиками его водности — с другой. С учетом того, что разветвленные русла верхней Оби и средней Лены отличаются морфологической сложностью и разнообразием типов, а также интенсивными переформированиями, гидролого-морфологический анализ обеспечивает для этих рек возможности прогнозирования русловых деформаций и выполнения сравнительного анализа разветвлений при решении практических задач. Гидролого-морфологический анализ является одним из направлений изучения гидроморфологии речных русел, включая их гидроморфометрию и гидроморфодинамику. Применение гидролого-морфологического анализа и получение зависимостей вида $\pi=f(Q)$, $\pi=f(L, K_c)$, где π — параметры форм русла, Q — водность, L, K_c — показатели степени устойчивости, позволяет оценить их возможные изменения при увеличении или уменьшении водности реки или ее рукавов, показателей степени устойчивости и учитывать эти изменения при

прогнозах русловых переформирований. То же касается зависимостей показателей интенсивности русловых деформаций разветвленных русел от тех же характеристик определяющих факторов.

Гидролого-морфологический анализ показывает, что соотношение длины и ширины островов изменяется в соответствии с изменением водности реки, устойчивости русла, и, соответственно, неодинаково для разных морфодинамических типов разветвлений (рис. 1.8). Достигая определенных (предельных) значений морфометрических параметров, отдельные острова либо объединяются в более крупные (продолжая эволюционный ряд), либо размываются. При этом молодые элементарные острова, образуясь, приобретают оптимальную форму, характерную для данного морфодинамического типа русла и его устойчивости [Львовская и др., 2015], соответствующую минимуму гидравлических сопротивлений, оказываемых островом на поток [Baker, 1977; Komar, 1983].

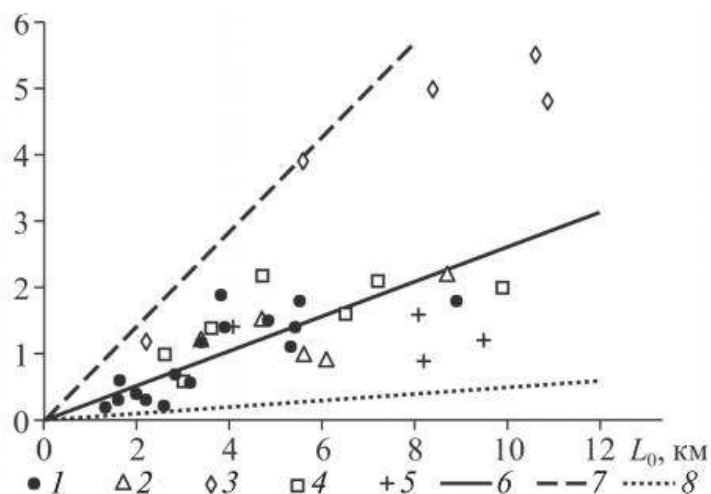


Рисунок 1.8 — Соотношение длины и ширины островов разветвлений различных морфодинамических типов на р. Печора: 1 — одиночные, 2 — односторонние, 3 — пойменно-русловые, 4 — сопряженные, 5 — параллельно-рукавные; 6 — нормальное соотношение ($L_o/B_o = 3,8$); 7 — верхняя граница ($L_o/B_o = 1,4$); 8 — нижняя граница ($L_o/B_o = 20$) [Львовская и др., 2015].

Анализируя морфометрические параметры островов (табл. 1.3), Е.А. Львовская [2016] установила, что по соотношению ширин и длин островов зависимости для рек Севера ЕТР (Печоры, Северной Двины, Мезени, Вычегды) дифференцируются по типам разветвлений. Для каждой реки были определены как средние значения соотношения L_o/B_o , так и предельные, при достижении которых острова либо объединяются в более

крупные, либо частично размываются, приобретая в том и другом случае оптимальную для данной реки форму.

Таблица 1.3 — Граничные и средние соотношения L_o/B_o островов на реках севера ЕТР [Львовская, 2016].

Река	L_o/B_o			Тип разветвления, отвечающий среднему
	Среднее	Нижняя граница	Верхняя граница	
Вычегда	2,7	8,8	0,8	Одиночные
Печора	3,8	20,0	1,4	Одиночные, сопряженные
Северная Двина	3,9	11,5	1,6	Односторонние, одионочные
Мезень	4,2	10,8	2,2	Одионочные

Исследования Е.А. Львовской явились пионерными относительно гидроморфологии разветвленных русел и формирующихся в них островов и таковыми пока остаются.

1.3. Изученность русловых процессов на верхней Оби, средней и нижней Лене.

Многолетние исследования русловых процессов на Оби и Лене, по существу, явились своеобразным полигоном, на котором разрабатывались многие методические вопросы их изучения, фундаментальные основы географического русловедения, в том числе проблемы формирования и режима разветвлений русла и связанные с ними прикладные проблемы, позволяющие на практике проверять достоверность полученных результатов.

Верхняя Обь. Получение первых разрозненных сведений о реках Обского бассейна и непосредственно самой Оби и, в первую очередь, ее верхнего течения, относится к XVII — началу XVIII веков, когда началось хозяйственное освоение юга Западной Сибири, а реки стали использоваться как водные пути сообщения. Первые описания русла Оби были сугубо утилитарными, содержали в себе приблизительные морфометрические характеристики (ширину, глубину, характер грунта и высоту берегов), направление течения; в то же время были составлены первые, в основном на основе визуальных наблюдений, схемы, на которых в первом приближении указывалось положение береговой линии, очертания некоторых островов и изгибов русла [Льготина, 1990].

Нужды водотранспортного использования все в большей степени определяли необходимость более точных изысканий. Поэтому к концу XIX — началу XX вв. русловыми партиями Томского округа путей сообщения были составлены подробные инструментальные карты и описания русла Оби (работы 1897–1899 гг.), а несколько

позднее был издан первый вариант атласа р. Оби от г. Бийска до юрт Тяговых [1905] (рис. 1.9).



Рисунок 1.9 — Обложка первого издания описания исследований р. Оби от г. Бийска до юрт Тяговых, 1905 г.

Русловым работам предшествовал богатый опыт общегеографических исследований и картографических работ, отражающих физико-географические условия реки, описания бассейна, максимально точные (на то время) очертания русла. Одним из наиболее значимых трудов стала топографическая карта Алтайского Горного округа, изданная на 28 листах в 1868 г. Ее фрагмент на участок верхней Оби приведен на рис. 1.10.



Рисунок 1.10 — Фрагмент листа топографической карты Алтайского Горного округа, сост. инж.-полковник Ф. Мейен, 1868 г, 28 л. Масштаб 1:420 000.

С начала XX века службой водного пути (Обское бассейновое управление пути и технические участки водного пути — теперь Администрация Обского бассейна и районы водных путей) стали проводиться регулярные съемки русла, описание и анализ наиболее сложных участков и осуществляться на их основе дноуглубительные и выправительные работы, стали издаваться регулярно (раз в 10–15 лет) лоцманские карты (теперь — карты реки), на которых отражено состояние русла на определенные временные срезы. Соответственно, на картах были изображены острова, их положение, размеры, характер берегов и растительности.

Следующим этапом в активном изучении и освоении водных ресурсов верхней Оби стала середина XX века, когда началось интенсивное развитие судоходства на Оби, освоение приречных территорий, строительство объектов хозяйственной инфраструктуры, мостовых переходов, водозаборов, была построена Новосибирская ГЭС с водохранилищем (1957). Среди основных исследований, проводившихся в то время на верхней Оби, были изыскания «Ленгидропроекта» при проектировании гидроузлов, из которых проект Каменской ГЭС не был осуществлен. Тогда же начались исследования руслового режима верхней Оби. Было выявлено и описано влияние Бии и Катунь на формирующуюся в объединенном русле Оби двухстречневую структуру потока [Мальберг, 1952]. Состоялась экспедиция ГГИ, в ходе которой была составлена первая общая характеристика морфологии русла, оценивалось влияние ГЭС на русловой режим и характер русловых переформирований на Оби [Попов, 1962].

Дальнейшие исследования тесно связаны с экспедициями Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, проводившимися под руководством Н.И. Маккавеева, а затем — Р.С. Чалова. Именно Н. И. Маккавеевым в монографии «Русло реки и эрозия в ее бассейне» [1955] речные острова рассматриваются как форма руслового рельефа, затапливаемая в половодье и покрытая растительностью, определена и показана основная роль островов в изменении гидродинамических характеристик потока. [Маккавеев, 1955].

С середины 1960-х гг. экспедициями МГУ регулярно проводились комплексные полевые и камеральные работы, куда входило составление крупномасштабных русловых геоморфологических карт, определение расходов воды и рассредоточения стока по рукавам в разветвлениях, исследование пойменных ландшафтов и руслообразующих наносов, определение показателей устойчивости, выполнялся русловый анализ, на основе которых дана характеристика русловых переформирований и обоснованы принципы и рекомендации по управлению русловыми процессами для совершенствования водного пути и создания устойчивой трассы судового хода. Результаты исследований нашли отражение в многочисленных публикациях: [Русловый режим средней Оби, 1969; Беркович, Чалов, 1973; Беркович и др., 1981; Беркович, Злотина и др., 1983; Беркович, Рулева, и др., 1989; Сидорчук, 1987; [Беркович, Гаррисон и др., 1990; [Русловый режим рек Северной Евразии, 1994; Русловые процессы и водные пути., 2001]. Также были подготовлены карты «Русловые процессы на реках СССР» [ГУГК СССР 1990], «Русловые процессы на реках Алтайского края» [ГУГК СССР, 1991] и обобщающая монография «Русловые процессы на реках Алтайского региона» [1996], в которых нашла отражение морфология и динамика русла верхней Оби.

С начала XXI века с развитием глобальных систем спутникового позиционирования, компьютерных методов обработки данных и моделирования, приборов и технических средств появились новые методы изучения русловых процессов. Однако бóльшая часть экспедиционных работ и публикаций была посвящена в основном средней (ниже Новосибирска) и нижней Оби (исследования 2014–2022 гг.), в то время как на верхней Оби проводились только регулярные съемки перекатных участков для обеспечения улучшения условий судоходства изыскательскими партиями (Барнаульский район водных путей и судоходства). Тем не менее их анализ позволил опубликовать статьи, касающиеся формирования и развития прирусловых отмелей на верхней Оби, их типизации и морфологии [Чалов, Жмыхова, 2014], а также сезонной и многолетней цикличности в развитии перекатов [Чалов, Сурков, 2002].

Вопросы формирования островов и их роли в развитии разветвлений различных типов на Оби и других реках Алтайского региона были рассмотрены В.Г. Смирновой [2002]. Согласно ее выводам, формирование разветвленных русел рек происходит в результате закрепления растительностью осередков; она привела данные по соотношению длины и ширины осередков коэффициенту их формы для рек Алтайского региона (в том числе на верхней Оби от слияния Бии и Катунь до г. Барнаула). Кроме того, ей выделены типы осередков по расположению в русле: осередки пристрежневой и прибрежной, периферийно-застойной зон, а также осередки в узле слияния рек; при этом показаны основные причины и механизмы формирования каждого типа осередкового разветвления.

Материалы исследований последних двух десятилетий русловых процессов на верхней и средней Оби с оценкой условий управления ими для совершенствования водного пути были обобщены в большой статье [Чалов, Рулева и др., 2018]. Непосредственно морфологии и переформированиям островов верхней Оби и зависимости от их морфометрических характеристик и морфодинамического типа русла посвящена специальная статья [Голубцов, Чалов, 2019], которая впервые акцентировала внимание на морфологии речных островов как важнейшем элементе геоморфологии русла и речных долин.

Таким образом, верхняя Обь с точки зрения русловых процессов является одной из наиболее исследованных рек России. Однако острова как форма рельефа, создающая русловые разветвления, остаются наименее изученным объектом, хотя именно на примере верхней Оби сделаны первые шаги в их геоморфологической оценке и роли в русловом режиме реки.

Средняя и нижняя Лена. Изучение морфологии и переформирований русла р. Лены началось намного позже, чем р. Оби, из-за более позднего хозяйственного освоения и труднодоступности территории, суровости физико-географических условий. Первые упоминания о судоходстве и выполнении примитивных гидрографических работ относятся ко второй половине XIX века; сведения о характере берегов, разветвленности русла, скоростях течения и расходах воды были крайне скудными. Однако еще русский писатель И.А. Гончаров, возвращаясь из морского путешествия вокруг Евразии сухопутным путем через Якутск, впоследствии в книге «Фрегат «Паллада» очень красочно описал многоукавность Лены, через которую он переправлялся. «Где же река?» — спросил я, глядя на бесконечное, расстилающееся перед глазами пространство песков лугов и кустов. «А вот она и есть — сказал наблюдатель, указывая на луга, пески и на проток сажень в пять шириной... — это все острова» — прибавил он». [Гончаров, 1858]. Лишь в начале XX в. была сформирована первая русловая партия, которая занималась

характеристикой условий судоходства. Первая публикация «Общие сведения о р. Лене с притоками и о работах на них в 1912 году / составитель инженер путей сообщения С.А. Васильев, нач. партии по исследованию рек Ленского бассейна» [Материалы..., 1913] содержала как физико-географическую характеристику региона, так и описания колебаний уровней воды, форм русла, описание перекатов и продольного профиля, а также включала в себя иллюстрации в виде 20 листов карт (рис. 1.11).

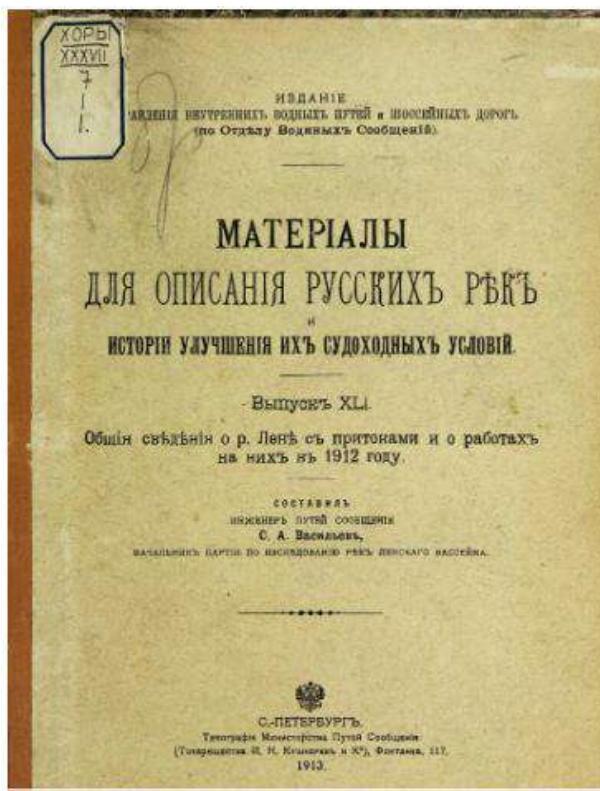


Рисунок 1.11 — Обложка книги «Материалы для описания русских рек и истории улучшения их судоходных условий. Вып. 41. Общие сведения о р. Лене с притоками и о работах на них в 1912 году».

Первые судоходные карты по реке Лене также были опубликованы в начале XX века. [Навигационная карта..., 1916], однако они ограничивались верхней и средней Леной до г. Якутска. В начале 1920-х годов капитан С. Горовацкий составил первую визуальную карту Лены ниже Якутска, которая была издана как первая лоция этой реки. На этой карте были по его зарисовкам отражены основные острова и положения судового хода среди них.

Первая крупная монография «Водные пути бассейна р. Лены» была опубликована в 1938 г. под редакцией Б. Зонова. [Водные пути..., 1938]. В ней приведена оценка водных путей по имеющимся на то время материалам, даны рекомендации по улучшениям условий судоходства в целом по реке и на отдельных перекатах. В монографии приведены обширные материалы в виде карт и схем русла, необходимых для обеспечения навигации

в условиях недостаточной обеспеченности лоцманскими картами, систематическое издание которых началось несколько позднее.

Послевоенный период на Лене характеризовался интенсификацией судоходства в связи с организацией северного завоза, выходом из реки на Северный морской путь и экономическим развитием районов Якутии и северо-востока страны. Одним из мощных стимулов изучения русловых процессов на Лене в связи с проблемами судоходства стали выход на юге бассейна железной дороги (БАМ) к Лене, создание здесь порта Осетрово и организация плавания судов класса «река-море» для обеспечения северного завоза и вывоза продукции с предприятий Крайнего Севера. Это потребовало регулярных гидрографических работ, обобщения и систематизации сведений о русловых процессах, поскольку активно стали выполняться землечерпательные и выправительные работы.

Однако научных трудов по русловым процессам на р. Лене до середины XX века не было. Только в 1952 г. вышла первая статья Г.Е. Чистякова «Русловые процессы на реке Лене в районе г. Якутска», в которой в том числе был рассмотрен фактор влияния вечной мерзлоты на русловые процессы, описаны переформирования прирусловых отмелей в районе Табагинского мыса и его влияние на структуру потока, опубликованы результаты первых буровых работ на островах и в русле. В результате было выявлено снижение эрозионной активности рек в период половодья, что связано с более поздним, чем прохождение пика половодья, началом таяния многолетнемерзлых пород. Было установлено также наличие ядер многолетнемерзлых пород в толще песчаных отмелей средней Лены, что приводит к снижению скоростей смещения побочной и стабилизации русла [Чистяков, 1952].

Наряду с изыскательскими партиями районов водных путей, которые в послевоенный период проводили регулярные промеры и съемки русла на наиболее тяжелых для судоходства участках и для обеспечения работ по дноуглублению плановым материалом, в 1969 г. начались регулярные исследования русловых процессов р. Лены практически на всем ее протяжении (исключая приустьевой участок — Ленскую «трубу»), осуществляемые экспедициями МГУ имени М.В. Ломоносова. Первые исследования выполнялись на отдельных затруднительных для судоходства участках, в дальнейшем охватив всю среднюю и нижнюю Лену. Результаты первого этапа исследований МГУ (1969–1974 гг.) были опубликованы в депонированном издании «Русловой режим средней и нижней Лены» (1976) и обобщающей статье [Беркович, Бореук, и др., 1981], в которых впервые дан анализ русловых процессов на Лене и обосновано решение воднотранспортных задач. Продолжающиеся в последующие годы и до настоящего времени исследования углубляли и развивали представления о развитии русла Лены,

способствовали разработке представлений о формировании разветвлений русла на крупнейшей реке и их трансформаций в условиях естественных изменений водности реки. Подробно анализировались в публикациях переформирования отдельных наиболее сложных разветвлений — «разбоя» Рассолода [Чалов, Завадский, и др., 2020], Покровско-Якутского [Чалов, Кирик и др., 2012; Чалов, Завадский и др., 2016, 2019], Приалданского [Чалов, Кирик и др., 2014], Белогорского [Чалов, Кирик и др., 2014] и ряда других участков. Некоторые участки, на которых исследования многократно повторялись, по существу, стали объектами руслового мониторинга, на которых отрабатывались многие детали русловых деформаций. К таковым участкам относится в первую очередь Якутский «разбой» (местное название сложноразветвленного русла), по которому опубликована серия статей. В ходе комплексных русловых исследований на Лене в районе г. Якутска особое внимание уделялось ретроспективному анализу переформирований и прогнозным оценкам развития Якутского «разбоя», где во второй половине XX века произошло формирование параллельно-рукавного русла и двухстрежневого потока, что происходило на фоне общего смещения реки к правому берегу и постепенного сокращения водности левого рукава — Адамовской протоки (табл. 1.4) и развития правого рукава (Буорыларской протоки), формирования в нем разветвлений 2-го порядка [Чалов, Завадский и др., 2016].

Таблица 1.4 — Изменение водности (в %) рукавов р. Лены у г. Якутска в межень [Чалов, Завадский и др., 2016, с дополнениями].

Рукав	Годы								
	1964*	1972	1985	2011	2013	2015	2016	2017	2018
Адамовская протока (левый)	55	70	50	35	30	40	30	35	32
Буорыларская протока (правый)	45	30	50	65	70	60	70	65	68

*1964 г. — по данным Новосибирского отделения института «Гипроречтранс», остальные годы — по измерениям экспедиции МГУ им. М.В. Ломоносова.

Крупной обобщающей работой по русловым процессам на р. Лене является монография «Водные пути бассейна Лены» [1995]. В ней даны анализ и прогнозные оценки морфологии русел и русловых процессов всей Лены, последовательно даются характеристики отдельных ее участков, в общем ключе затрагиваются вопросы формирования и динамики островов как основных элементов разветвленного русла. Общая характеристика Ленских «разбоев» по данным последующих исследований

приведена в специальной статье Р.С. Чалова и О.М. Кирика [2015], в которой впервые рассмотрены закономерности морфологии и динамики параллельно-рукавных разветвлений, абсолютно преобладающих на средней и нижней Лене, в том числе причины замедления темпов трансгрессивного смещения островов, расположенных главным образом в активной части русла, в стрежневой зоне потока.

Ряд работ последних десятилетий по р. Лене посвящен факторам русловых процессов, в основном гидроклиматическим и связанным с распространением многолетнемерзлых пород в русле и их влиянием на темпы русловых деформаций [Зайцев, Тананаев, 2008; Тананаев, 1997, 2004, 2005]. Показано, что изменения климатических характеристик привели к увеличению стока воды на нижней Лене и теплового стока [Магрицкий, 2015], что было увязано с происходящими естественными трансформациями русловых разветвлений (в частности, сменой сопряженных разветвлений параллельно-рукавными и морфологическим усложнением уже существовавших последних [Чалов, Завадский и др., 2016; Чалов, Завадский и др., 2019]. Изменения в состоянии мерзлоты в русле р. Лены отмечены в том числе многими зарубежными исследователями [Yang et.al., 2002]; [Cotard et.al., 2003, 2007]; [Gautier et.al., 2003, 2002], обратившими внимание на активизацию термоэрозионного воздействия потока на берега, острова и отмели.

В последнее время при анализе русловых разветвлений на р. Лене определенное внимание было уделено островам. Так, при выявлении гидролого-морфологических зависимостей была установлена [Кузьмина, Чалов, 2020] связь размеров островов с типами разветвленного русла и его морфометрическими характеристиками. Типизация островов (в том числе на Лене) упоминается также в связи с вопросами терминологии и классификации разветвлений [Чалов, Чалова, Голубцов, 2021] и в разносторонней оценке условий формирования, гидроморфологии, особенностей режима деформаций и трансформаций параллельно-рукавных разветвлений, являющихся на средней и нижней Лене самыми сложными и разнообразными по морфодинамике по сравнению с другими реками, на которых встречается этот тип русла [Чалов, Беркович и др., 2020].

Таким образом, в отношении изученности русловых процессов средняя и нижняя Лена, подобно верхней Оби, в настоящее время представляет собой одну из наиболее изученных рек, материалы исследований которой положены в основу многих современных теоретических представлений в гидроморфологии и морфодинамике речных русел.

Верхняя Обь, средняя и нижняя Лена, будучи крупнейшими реками и одними из наиболее важных с точки зрения хозяйственного освоения, на протяжении долгого

времени являлись объектом исследований русловых процессов и динамики русла. В результате были выявлены закономерности морфологии их русел, режима деформаций и формирования разветвлений, их типизации, рассредоточения стока и обоснования методов регулирования при освоении речных ресурсов. Однако острова — важная составляющая разветвлений — упоминались либо косвенно, либо рассматривались очень локально, в пределах отдельных звеньев разветвлений. Кроме того, острова, будучи динамичными образованиями, испытывающими непрерывные переформирования, обуславливают изменения в структуре потока и режиме разветвлений, которые они создают. Отсюда вытекает определенный пробел в региональном русловедении и необходимость их гидролого-морфологического и морфодинамического анализа. В этом отношении верхняя Обь, средняя и нижняя Лена представляют собой чрезвычайно интересный объект как с точки зрения сложности и многообразия разветвлений, так и хорошей изученности рек, благодаря которой имеется разносторонний необходимый исходный материал для научного анализа. Таким образом, проведение гидролого-морфологического анализа, получение связей между их морфометрическими характеристиками и условиями формирования и устойчивостью на протяженных участках русел обеих рек является приоритетной задачей в исследованиях русловых процессов в контексте изучения островных (русловых) разветвлений.

ГЛАВА 2. УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ШИРОКОПОЙМЕННЫХ РУСЕЛ НА ОБИ И ЛЕНЕ.

2.1. Общая характеристика бассейнов рек Оби и Лены.

Лена — одна из крупнейших рек России и мира, берет начало на западном склоне Байкальского хребта, пересекает Иркутскую область и Республику Саха (Якутию) и впадает в море Лаптевых. Общая площадь бассейна составляет около 2,45 млн. км², а длина — 4440 км (рис. 2.1).

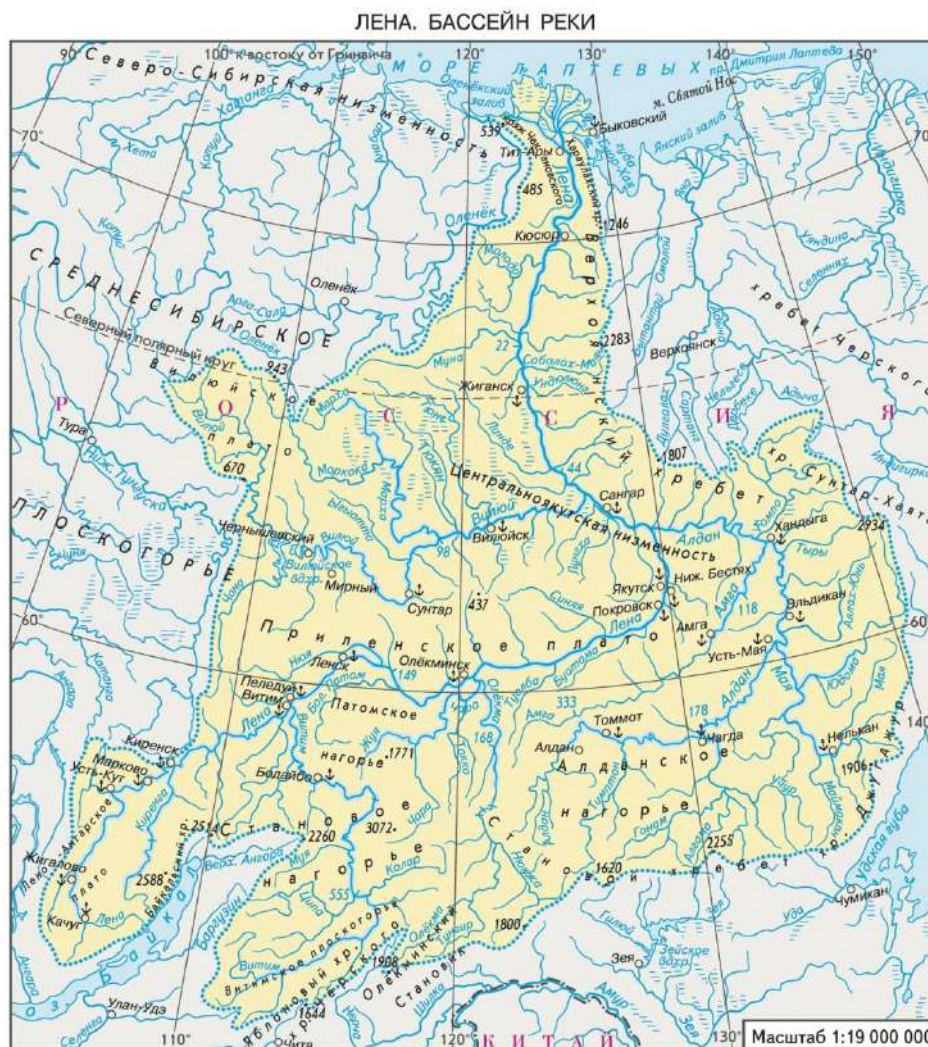


Рисунок 2.1 — Общая схема бассейна р. Лены [https://bigenc.ru].

Река имеет большую протяженность в субмеридиональном направлении, что обуславливает разнообразие природных факторов русловых процессов. Исток реки расположен на высоте около 1470 м над уровнем моря, однако уже в районе устья р. Олекмы меженные отметки уреза находятся на высоте 125 м, в районе г. Якутска — на высоте 85–87 м, что обуславливает многократное уменьшение уклонов на средней и особенно нижней Лене, по сравнению с ее верхним течением. Основными крупными

притоками Лены ниже г. Якутска являются Алдан и Вилуй, которые увеличивают ее водоносность в общей сложности на 40–45 %). Кроме них ниже Алдана Лена принимает ряд небольших притоков (табл. 2.1). Отличительной особенностью бассейна р. Лены, особенно в среднем и нижнем течении, является наличие многолетней мерзлоты, которая выступает важным фактором развития русловых процессов, определяя скорости русловых переформирований или выступая регулятором стока воды и наносов с водосборного бассейна, определяя водный и уровенный режим реки.

Таблица 2.1 — Основные притоки р. Лена между г.п. Табага и г.п. Кюсюр.¹

Название	С какого берега впадает	Расстояние от устья, км	Длина реки, км	Площадь водосборного бассейна, км ²	Среднегодовой расход, м ³ /с
Алдан	правый	1311	2273	729000	5245
Лунха	левый	1132	533	10300	24
Вилуй	левый	1102	2650	454000	1485
Лямпушка (Лэпискээ)	правый	1057	299	10400	102
Дянышка	правый	1005	295	13300	80
Линдэ	левый	985	804	20000	100
Юндюлюн (Ундюлюнг)	правый	820	414	12800	135
Соболоох-Майан (Собопол)	правый	701	411	13300	136
Муна (Улахан-Муна)	левый	606	715	30100	40
Мэнгкэрэ	правый	583	402	15900	≈150

Климат бассейна Лены резко континентальный, с длительной, исключительно суровой, холодной зимой и коротким, относительно теплым летним периодом. Характеризуется быстрыми переходами от холодного времени года к теплему и наоборот, и высокими амплитудами температур в течение всего года, включая суточные. Переход средней суточной температуры через ноль осуществляется в конце апреля - начале мая,

¹ Таблицы, рисунки и фотографии, размещенные без указания ссылки на источник выполнены/сделаны автором диссертации.

осенью – во второй половине сентября. Значения среднегодовой температуры на большей части территории – ниже -9° . Средняя температура января (самого холодного месяца) – $38,5^{\circ}$, средняя температура июля $19,5^{\circ}$; абсолютный максимум составляет $+39^{\circ}$, что является довольно высоким значением для территории, расположенной в столь высоких широтах [Гриненко, Камалетдинов и др. ...,1995]. Очень высокие годовые колебания температуры обуславливают большую разницу между минимальными и максимальными температурами – $90-100^{\circ}$ (рис. 2.2).

Количество осадков колеблется от 200 до 400 мм/год, из них большая часть (около 60 % приходится на осадки теплого периода (до 150 мм). Осенью выпадает порядка 25% всей суммы осадков, весна более засушлива. Наименьшее количество осадков выпадает в зимний период – не более 10% от их общего количества [Атлас.,1981]. В среднем наибольшая сумма осадков выпадает в июле и составляет 40 мм, а наименьшая в феврале (7 мм). Постепенное оттаивание многолетней мерзлоты в теплый период года способствует дополнительному поступлению влаги в почву. В целом, зональность распределения осадков в бассейне Лены не выражена, что обусловлено сложным рельефом.

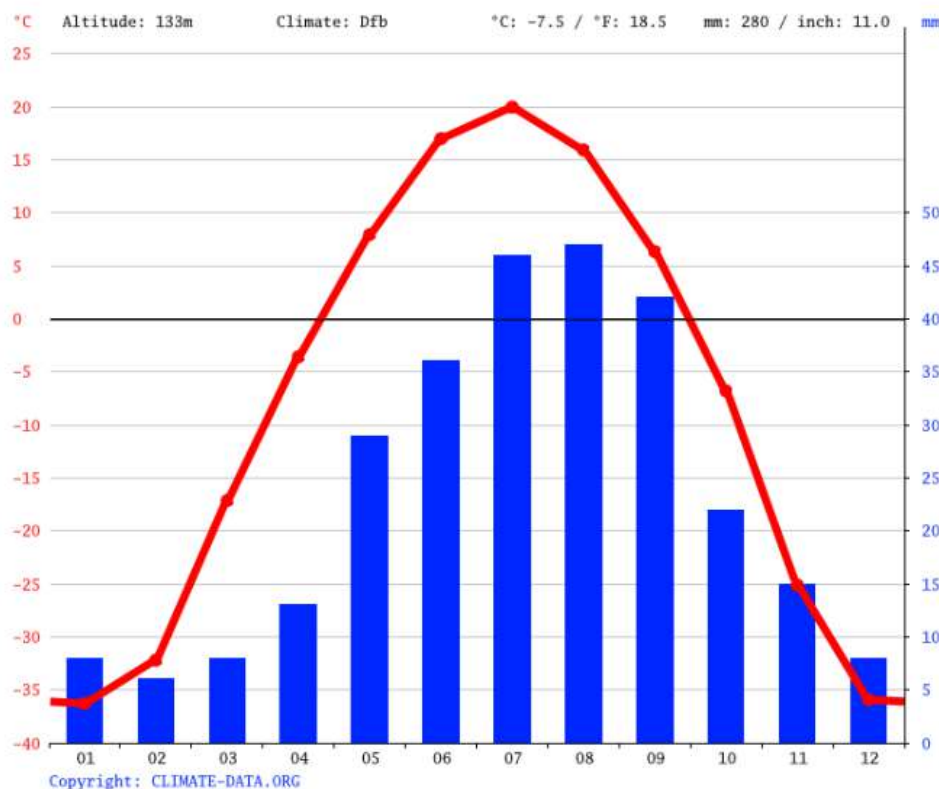


Рисунок 2.2 — Климатограмма г. Якутск [climate-data.org]

Территория не отличается очень высокими скоростями ветра, преобладающее направление – северо-западное, в зимний период – северное. Максимальная скорость

ветра для г. Якутска составляет 19,5 м/с. Средние скорости ветра на участке в период навигации составляют 1,7-2,3 м/с, при этом в зимний период они ниже (0,7-1,1 м/с). Повышенные скорости ветра на Лене приводят к возникновению штормов с последующей активизацией размывов берегов, особенно сложенных легкоразмываемыми отложениями. При высоких скоростях ветра, на открытых пространствах прирусловых отмелей и осередков происходит перевывание песков и возникновения там специфических эоловых форм рельефа (вплоть до песчаных дюн).

Устойчивый снежный покров образуется в среднем в конце октября - начале ноября, его высота в среднем не превышает 40-50 см (табл. 2.2), а наибольшие запасы снега формируются к концу зимы, когда высота достигает наибольших значений.

Таблица 2.2 — Характеристика снежного покрова на рассматриваемом участке долины р.Лены (м/с. г. Якутск) [climate-data.org].

Месяц	Я	Ф	М	А	М	И	И	А	С	О	Н	Д	Год
Число дней со снежным покровом	31	28	31	26	1	0	0	0	1	19	29	31	195
Высота, см	27	31	33	21	0	0	0	0	0	4	15	22	-
Макс. высота, см	47	47	51	45	25	0	0	0	7	26	39	50	51

Долина средней и большей части нижней Лены расположена в мерзлотно-таежной ландшафтно-климатической зоне [Атлас..., 1989]. Согласно ландшафтно-мерзлотной карте Республики Саха, на протяжении всего участка в днище долины преобладает комплекс среднетаежной долинной растительности. Склоны отрогов Верхоянского хребта напротив устья Вилюя представлены склоновым делювиально-коллювиальным комплексом, занятым кустарничково-лишайниковыми и моховыми лиственничными редколесьями, поверхности высоких террас представлены мохово-ерниковыми редколесьями, нередко заболоченными. Ниже г. Якутска на участке до устья Алдана, помимо долинного комплекса ландшафтов на низкой береговой пойме и на молодых островах, более высокие поверхности склонов долины и междуречий (преимущественно правого берега) заняты лиственничными мохово-кустарничковыми а также сосновыми кустарничково-лишайниковыми лесами, с господством межлассных ландшафтов. Вдоль долин крупных притоков (Лямпущка, Дянышка, Линдэ), особенно ниже устья Алдана и Вилюя развиты комплексы северотаежной долинной растительности. Пойма, по большей части залесена, особенно это становится характерно ниже устья Алдана. Характер растительности на островах изменяется, главным образом, от стадии эволюции острова. Так, наиболее

молодые острова покрыты в основном луговой разнотравно-злаковой растительностью, а также кустарником. На них наиболее распространены: осока, горошек, а также полевой хвощ. Кустарниковая растительность представлена в основном ивой Гмелина, более крупные острова и островные массивы покрыты древесной растительностью высотой до 10-15 м. Междуречья и поверхности высоких надпойменных террас заняты светлохвойной лиственничной бруснично-зеленомошной тайгой.

Почвы на водораздельных поверхностях дерново-карбонатные и палевые мерзлотные. В днище долины развиты аллювиальные почвы, на сильнозаболоченных участках – болотные почвы и торфа. [Атлас СССР, 1983].

Река Обь является крупнейшей рекой Западной Сибири и одной из крупнейших рек России. Площадь ее бассейна составляет 2,99 млн. км², ее длина — 3650 км. Значительная протяженность реки с юга на север также обуславливает смену ландшафтно-климатических зон, а значит — смену природных факторов русловых процессов, определяющих главным образом характеристики стока, темпы и характер русловых деформаций (рис. 2.3). По водоносности и ее изменениям по длине реки, особенностям формирования стока воды и водного режима, особенностям питания Обь делится на три крупных участка, из которых к верхней Оби относится участок от слияния Бии и Катунь до устья р. Томи [Русловые процессы на реках..., 1996].



Рисунок 2.3 — Общая схема бассейна Оби [<https://bigenc.ru>].

Однако после создания Новосибирского водохранилища верхнюю Обь стали ограничивать сужением долины у г. Камня-на-Оби, где выклинивается водохранилище, а Обь ниже него (от плотины ГЭС в районе г. Новосибирска) относить к средней Оби. В зависимости от геологического строения и геоморфологии долины верхнюю Обь можно фрагментировать на более короткие участки, характеризующиеся определенными параметрами русла, его преобладающим морфодинамическим типом (вплоть до отдельных типов разветвлений) и интенсивностью развития русловых переформирований (скоростью размыва берегов, смещения островов и т.д.). Границы участков также определяются геолого-геоморфологическими особенностями строения долины — ими являются ее коленообразные изгибы, после которых река меняет свое направление течения: у устья р. Чарыш, где происходит смена направления с широтного на

меридиональное, и у г. Барнаула — с меридионального на широтное). Роль притоков на рассматриваемом участке русла невелика в силу их относительно малой водности (табл. 2.3).

Таблица 2.3 — Основные притоки р. Обь в пределах Алтайского края.

Название	С какого берега впадает	Расстояние от устья, км	Длина реки, км	Площадь водосборн. бассейна, км ²	Среднегодовой расход, м ³ /с
Песчаная	левый	3631	276	5660	23
Ануй	левый	3626	327	6930	19
Чарыш	левый	3550	547	22200	120
Алей	левый	3490	858	21100	33,8
Чумыш	правый	3333	644	23900	146

Обь — типично равнинная река, однако ее водный режим и режим некоторых ее притоков формируется в предгорных и даже горных условиях. Неоднородность природных условий и распределения составляющих водного баланса: осадков, стока и испарения определяют гидрологический режим и, как следствие специфику русловых преформирований.

Территория бассейна верхней Оби, обладая значительными размерами, относится к умеренному климатическому поясу и характеризуется континентально-циклоническим его типом с продолжительной холодной зимой и сравнительно теплым летом. Открытость территории с севера-запада и юго-запада обуславливает господство континентальных воздушных масс в течение всего года, а также возможность проникновения арктических и тропических воздушных масс севера и юга соответственно. Летний период характеризуется западным переносом воздушных масс, с преобладанием системы циклонов и антициклонов, грозовыми фронтами и ливневым характером осадков. В теплый период года на территорию также вторгаются сухие и жаркие воздушные массы из Среднеазиатского региона, влияние которых наиболее велико в южных и юго-восточных частях бассейна. Зимний период характеризуется господством сибирского антициклона, низкими температурами воздуха и небольшой влажностью [Атлас., 1978]. Средняя температура самого холодного месяца (января) — 19 °С, (минимальные до - 45). Самым теплым летним месяцем является июль, средняя температура которого 20 °С, в отдельные годы максимальные значения достигают 38-40 °С (табл. 2.4) [Энциклопедия, 1995]. При продвижении на юго-восток, под влиянием гонных хребтов Алтая, климат

становится мягче, продолжительность безморозного периода увеличивается, уменьшается число дней со снежным покровом.

Таблица 2.4 — Температура воздуха г. Барнаул (1955-2010 гг.) [Энциклопедия, 1995].

Месяц	Т, °С, абс.мин	Т, °С, сред.мин	Т, °С, сред	Т, °С, сред.макс	Т, °С, абс.макс
Январь	-48,2 (2001)	-20,1	-15,5	-10,8	5,3 (1997)
Февраль	-42,9 (1969)	-18,7	-13,7	-8,1	7,4 (1983)
Март	-35,5 (1971)	-11,8	-6,5	-0,6	16,4 (1989)
Апрель	-27,6 (1987)	-1,2	3,8	10,1	32,3 (1997)
Май	-8,8 (2000)	6,5	12,8	20,1	37,4 (1980)
Июнь	-1,2 (1968)	11,6	17,7	24,3	36,6 (1988)
Июль	2,9 (1988)	14,0	19,9	26,3	37,9 (1974)
Август	0,4 (1967)	11,5	17,4	24,3	38,3 (2002)
Сентябрь	-7,8 (1971)	5,6	11,0	17,7	34,0 (1966)
Октябрь	-27,0 (1976)	-0,4	3,8	9,2	27,4 (1971)
Ноябрь	-38,9 (1987)	-10,0	-6,3	-2,2	15,3 (1978)
Декабрь	-43,7 (2012)	-17,4	-12,9	-8,5	6,3 (1996)
Год	-48,2 (2001)	-2,5	2,6	8,5	38,3 (2002)

Среднегодовое количество осадков неодинаково и в зависимости от территории составляет от 420 до 820 мм, при этом преобладают осадки в жидком виде. На период их выпадения (апрель–октябрь) приходится наибольшее число дней с осадками и выпадает приблизительно 65 % от общего их числа. Причем до 40% приходится на июль и август. В отдельные засушливые годы количество осадков не превышает 350 мм. Летом осадки носят ливневой характер, и играют значительную роль в формировании стока реки в данный период, обуславливая кратковременные повышения уровней (особенно ярко это проявляется в горных частях бассейна верхней Оби, Бии и Катуня, где выпадающие дожди дают быстрый подъем уровней, и столь же быстрое прохождение волны паводка вниз по течению).

Образование устойчивого снежного покрова начинается в первой декаде ноября, Средняя высота варьируется в зависимости от условий местности, и составляет от 40-60 до 75 см (табл. 2.5). Наибольшая высота снежного покрова, а соответственно, и влагозапасы, обуславливающие значительную долю питания реки, возрастают ближе к концу зимнего периода, составляя от 80 до 100 мм. [Энциклопедия, 1995].

Таблица 2.5 — Характеристики снежного покрова по основным метеостанциям [climate-data.org].

Метеостанция г. Барнаул													
Месяц	Я	Ф	М	А	М	И	И	А	С	О	Н	Д	год
Число дней	31	28	31	11	0,1	0	0	0	0,1	5	24	31	161
Высота, см	38	47	45	6	0	0	0	0	0	1	8	23	-
Макс. высота, см	83	96	79	70	14	0	0	0	21	20	50	80	96

Среднегодовые скорости ветра составляют от 2 до 4 м/с, отмечаются штормовые ветры до 15 м/с, максимальные до 30 м/с. Преобладают ветры западного и юго-западного направлений. Работа ветра заключается в возникновении волнения, способствующего разрушению берегов. Ветер также способствует перевеванию отмелей и образованию дюн вдоль бровки поймы, что обеспечивает поступление наносов на пойму и правобережные острова [Беркович, Злотина, Рязанов, 1983].

При прочих равных условиях река оказывает тепляющее воздействие на прилегающую территорию. Полоса вдоль русла реки отличается повышенными зимними температурами воздуха и повышенной влажностью (в среднем тепляющее воздействие повышает отметки окружающих междуречий на 1-2 градуса). В летний период максимальные температуры ниже, чем на окружающих водоразделах, интенсифицируется грозная деятельность.

Почвы, растительность. На правобережье, на поверхности низких надпойменных террас распространены террасовые боры, брусничные, травяные и беломошные сосновые леса. Пойменная растительность левого берега представлена в основном болотно-луговой растительностью, в прирусловой части с зарослями ивняка и ивово-тополевыми лесами [Сурков, 1999]. На пойме также распространены солонцово-солончаковые, болотно-солонцовые луга, местами остепененные, а также тростниковые болота, солонцеватые степи. Растительность на молодых островах представлена луговыми и кустарниковыми формациями, с отсутствием древесных форм. На крупных и редкостопляемых островах формируются березовые и березово-тополевые леса с обильно развитым подлеском (кустарниковая ива). Степень залесенности поймы составляет 35-40% [Сурков, 1998].

По мере удаления от русла, левобережье покрывается разнотравно-ковыльными богатыми степями с небольшими участками березово-тополевых и осиново-березовых лесов. В днище долины на пойме преобладают лугово-черноземные и луговые почвы, на более высоких гипсометрических уровнях и на междуречьях – подзолистые и дерново-подзолистые. [Сурков, 1999].

2.2. Условия формирования широкопойменного русла р. Оби.

2.2.1. Геолого-геоморфологические условия формирования русла верхней Оби.

Формирование современного рельефа юго-восточной части Западно-Сибирской низменности происходило под влиянием новейшей тектоники и крупных климатических изменений в северном полушарии. Среди многочисленных неотектонических структур региона наибольшее распространение имеют структуры с чертами унаследованности от древних этапов развития фундамента. К таким структурам в бассейне верхней и средней Оби относятся Колпашевская и Бийско-Барнаульская впадины, Обское поднятие и Колывань-Томская складчатая зона. Структурная приуроченность главных элементов эрозионного рельефа — одна из черт унаследованности: речные долины приурочены к впадинам, а водоразделы — к поднятиям новейшего тектонического этапа [Адаменко, Вдовин, 1967].

В отношении крупных тектонических структур бассейн верхней Оби (в пределах Алтайского края) находится в переходной (предгорной) зоне от молодой Западно-Сибирской платформы к орогенным сооружениям Алтая [Рулева, Барышников, 2015]. Участок находится на юго-востоке Кулундинской депрессии, являясь частью Бийско-Барнаульской впадины. Мощность плиоцен-четвертичных толщ, входящих в состав мезокайнозойского осадочного чехла, составляет от 800 до 1200 м, при продвижении на юго-восток она снижается до 500–700 м.

Тектоническое развитие Бийско-Барнаульской впадины привело к тому, что здесь на протяжении длительного времени господствовали процессы аккумуляции. В этот период здесь происходило интенсивное накопление аллювиальных, аллювиально-озерных и эоловых лессовидных отложений. Последующее поднятие на большей части территории привело к переработке исходного аккумулятивного рельефа. Активно развивались эрозионные процессы, обособлялись возвышенные и низменные равнины. Различные направления и амплитуда тектонических движений обусловили различные темпы эрозионного расчленения. Низкий гипсометрический уровень днища формирующейся долины Оби обусловил сильное расчленение ее бортов [Геология СССР, 1967]. Инверсионное развитие Бийско-Барнаульской впадины отмечается с конца среднего плейстоцена, когда начинает формироваться Приобское плато. Смена тектонического опускания поднятием привела к формированию сложной, с системой коленообразных, крутых изгибов долины Оби (один из таких изгибов расположен при впадении р. Чарыш). В верхнем течении река пересекает Приобское плато с абсолютными отметками 200–250 м, что при отметках современного уреза порядка 140–145 м говорит о глубине вреза долины в слабоволнистую поверхность плато, равную 100–110 м. Само Приобское плато

сложено мощной толщей рыхлых отложений четвертичного времени (в основном лессовидными суглинками с прослоями песка и супесей).

На субширотном отрезке долины (от слияния до устья Чарыша) левый коренной берег представлен уступом Колыванского увала, представляющего собой относительно повышенный участок плато, с отметками 250–270 м. Бийско-Чумышская возвышенность, занимающая большую площадь в бассейне верхней Оби, обладает более расчлененным холмисто-увалистым рельефом с преобладающими высотами 300–420 м. Долина р. Оби и ее днище (пойма + русло) располагается по границе возвышенности (правобережье реки) и Предалтайского степного плато (левобережье).

Ниже 100 км от слияния Бии и Катуни, в месте впадения левого притока — р. Чарыш, долина верхней Оби меняет направление на субмеридиональное. Левый берег становится коренным, высоким, представлен уступом пологой увалистой равнины — Приобским степным плато, которое дренируется левыми притоками Оби (Алей, Барнаулка, Касмала) [Атлас ..., 1978]. Их долины находятся в широких и достаточно глубоких (до 30–40 м) ложбинах, вытянутых в северо-восточном направлении. Эти ложбины древнего стока определяют расчлененность Приобского плато на ряд параллельно вытянутых широких плоских увалов. Для приобовочного участка левобережья характерно интенсивное оврагообразование и оползневые процессы [Демин, 1993]. Правобережье здесь низменное, представлено широкой поймой реки (ширина ее 7–9 км, иногда больше).

В долине верхней Оби широко представлен комплекс надпойменных террас. Террасы верхней Оби образуют широкую ступенчато-наклонную равнину, протягивающуюся вдоль Обь-Чумышского плато от г. Бийска до г. Камень-на-Оби. Здесь выделяются четыре террасовых уровня: с высотами над урезом 8–12 (до 18 м), 20–30 м, 30–35 (до 40) и 40–55 (до 60) м соответственно. На правом берегу субширотного участка весь комплекс террас сложен песками, и только в верхней части толщи отмечаются лессовидные суглинки. Галечники встречаются в основном в основании обрывов террас ниже слияния Бии и Катуни (с. Фоминское). Вдоль левого берега террасовый комплекс редуцирован и представлен только отдельными фрагментами низкой террасы, которая отделяет пойму от уступа Колыванского увала.

Для всех террас характерна интенсивная переработка экзогенными процессами, в основном эоловыми и эрозионными, которая продолжалась на протяжении всего голоцена. Террасам наиболее высоких уровней присуща пологоволнистая или волнистая поверхность, осложненная западинами и расчлененная сетью оврагов и небольших эрозионных врезов. Западины имеют, как правило, суффозионный генезис, некоторые

представляют собой следы стариц. Повышенная просадочность поверхностей высоких террас обусловлена лессовидными суглинками, слагающими эти террасы. Общая мощность лессов и лессовидных суглинков составляет первые десятки метров. В целом скорости развития эрозионной сети неодинаковы на разных гипсометрических уровнях террас, что обусловлено различием в крутизне склонов, а также разной инфильтрационной способностью отложений (на песчаных террасах скорость роста оврагов меньше, чем на супесчаных и суглинистых) [Маккавеев, Чалов, 1964]. Относительные глубины эрозионных форм колеблются в пределах от 10 до 25 м. Террасы низких уровней также осложнены долинно-балочными системами, местами стрежень потока проходит непосредственно вдоль берега, обеспечивая его размыв и формирование крутого, почти вертикального уступа и способствуя поступлению материала в русло и увеличению стока влекомых наносов [Демин, 1993].

В связи с особенностями строения долины верхней Оби здесь преобладает односторонняя пойма (до 65 % от общей длины), причем на участке от слияния Бии и Катунь до устья Чарыша пойма — левобережная, ее ширина постепенно увеличивается от 1,5 до 12–15 км по мере удаления от узла слияния, причем наиболее широкие участки приурочены к местам впадения притоков (Песчаная, Ануй, Чарыш). Ниже коленообразного изгиба русла, где река меняет свое направление на субмеридиональное, развита правобережная пойма, общая ширина которой составляет 8–12 км [Злотина, 1989]. Средняя относительная высота поймы меняется от 4–5 до 2,5 м вниз по течению, ниже устья Чарыша она стабильная — 2–4 м над меженным урезом реки. Такая ступенчатость поймы вызвана направленным врезанием реки. Литологический состав отложений, слагающих пойму на всем протяжении, достаточно однотипен и представлен в основном песками, супесями и суглинками с редкими прослоями более крупного материала: гальки и гравия, залегающего в основном в основании пойменной толщи. Отличительной особенностью поймы верхней Оби является ее большая ширина по отношению к ширине русла, практически на всем протяжении участка выдерживается соотношение 1:3–1:4. При этом ширина поймы увеличивается за счет обмеления периферийных рукавов и причленения к берегу островных массивов в ходе русловых переформирований [Сурков, 1999].

Геологическое строение долины верхней Оби во многом определяет и состав руслообразующих наносов. Если на приустьевых участках рек Бии и особенно Катунь аллювий имеет песчано-галечный состав, то в долине Оби он в основном представлен разнозернистыми песками, иногда сменяющимися супесями и илами [Жайворон, Чалов, 1990]. Основной тенденцией в распределении руслообразующих наносов по длине реки

является их постепенное (а первые 20 км — более резкое) уменьшение по мере удаления от узла слияния, что обусловлено быстрым снижением уклонов. В нижнем течении они равны 0,02–0,03 ‰ (при значениях 0,18–0,20 ‰ непосредственно ниже слияния Бии и Катунь). Мощность аллювия значительна, иногда превышает максимальную глубину плесовых ложин и колеблется от 7 до 15 м. Современное осадконакопление происходит также в озерно-болотных понижениях на пойме, в ложбинах на поверхности борových террас. Такие осадки, как правило, представлены илами и торфами, имеют мощность от 0,2 до 4 м [Русловые процессы ..., 1996].

В геоморфологическом отношении Приобское степное плато и Бийско-Чумышское междуречье представляют собой, соответственно, пластово-аккумулятивные или аккумулятивные равнины на рыхлых, неоген-четвертичных отложениях (рис. 2.4). Возвышенные и предгорные участки водосборного бассейна верхней Оби представляют собой области сочленения платформенных равнин и орогенов и являются субгоризонтальными и наклонными пластово-аккумулятивными равнинами. Ниже г. Барнаула большая часть водораздельных поверхностей лево- и правобережья представлена наклонными аккумулятивными равнинами при преимущественных новейших опусканиях заполненными рыхлыми неоген-четвертичными отложениями.

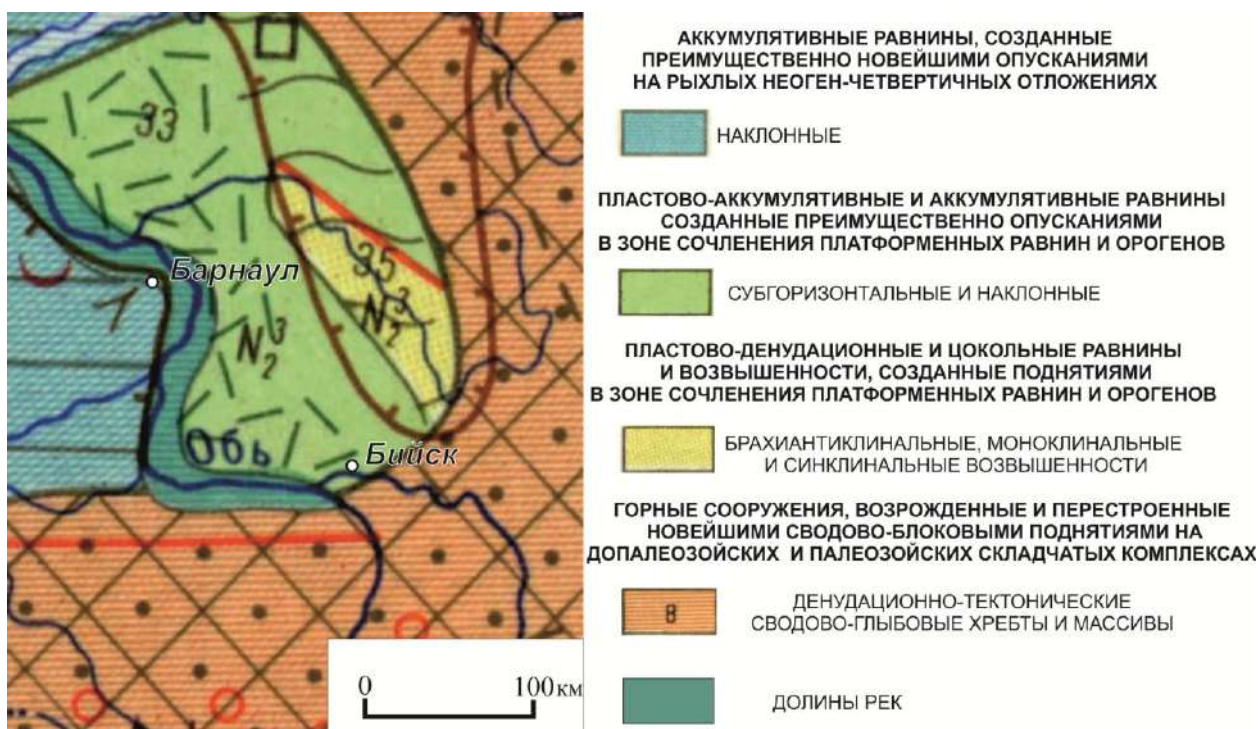


Рисунок 2.4 — Фрагмент геоморфологической карты СССР [1983] на рассматриваемый участок бассейна р. Оби.

2.2.2. Гидрологический режим участка верхней Оби.

Среднегодовой объем стока Оби непосредственно ниже слияния Бии и Катунь равен $36,3 \text{ км}^3$, возрастая ниже по течению (у г. Барнаула — до $45,7 \text{ км}^3/\text{год}$). По мере удаления от слияния незначительно возрастает доля стока в половодье и уменьшается доля летне-осеннего. Это обусловлено увеличением доли снегового и грунтового питания при продвижении реки на север. Большое влияние на характер стока оказывает пойма, выступая в этом отношении его регулятором: благодаря затоплению поймы происходит увеличение продолжительности половодья и снижение максимальных уровней.

На верхней Оби ниже слияния Бии и Катунь средний максимальный расход, по данным г/п Фоминское (5 км ниже слияния), составляет $5190 \text{ м}^3/\text{с}$, наибольший — $11\,200 \text{ м}^3/\text{с}$, средний минимальный — $659 \text{ м}^3/\text{с}$, наименьший — $360 \text{ м}^3/\text{с}$. Абсолютный минимум для зимнего периода — $125 \text{ м}^3/\text{с}$. Среднегодовой расход воды для данного участка равен $1150 \text{ м}^3/\text{с}$ [Русловые процессы ..., 1996].

Водный режим р. Оби формируется в условиях континентального климата; верховья водосбора расположены в горных районах, собственно верхняя Обь — в степной и лесостепной зонах. Верхняя Обь не зарегулирована, поэтому основные фазы водного режима, характерные для ландшафтно-климатических условий бассейна, хорошо выражены, в отличие от участка, расположенного ниже г. Новосибирска, где после строительства Новосибирской ГЭС (1957–1959 гг.) режим реки изменился, — отмечается заметное сокращение стока в весенний период и его увеличение в период зимней межени.

Тип питания верхней Оби — смешанный, с преобладанием снегового, доля которого достигает 50 %, около четверти годового стока формируется дождевым питанием, 16 % — подземными водами. Так как верховья Катунь находятся в горных областях с распространением горного оледенения, то для самой реки, а соответственно, для верхней Оби, характерно наличие доли ледникового питания, которая составляет около 8–10 % общего стока (табл. 2.6). Она достигается за счет талых ледниковых вод Катунь, поскольку в структуре питания Бии ледниковая составляющая отсутствует [Русловые процессы и водные пути ..., 2001].

Таблица 2.6 — Соотношение типов питания рек Бии, Катунь и Оби [Русловые процессы и водные пути..., 2001].

Река	Типы питания, % от годового			
	Снеговое	Дождевое	Грунтовое	Ледниковое

<i>Бия</i>	55	30	15	0
<i>Катунь</i>	44	20	28	8
<i>верхняя Обь</i>	51	26	16	7

Внутригодовое распределение стока воды, характеризующееся прохождением основной его части период весеннего половодья, прерываемой дождевыми паводками, летне-осенней меженью и минимальными уровнями и расходами воды в зимнюю межень, когда река покрыта льдом (табл. 2.7). В зависимости от водности года на Оби в период половодья проходит до 60 % годового стока, при этом наибольший сток наблюдается в мае и июне (до 28 % годового стока). На летне-осенний период приходится от 32 % до 42 %, наименьшие значения – в октябре (5 % стока). В период зимней межени доля стока минимальна, в январе марте она не превышает 1–2 %.

Таблица 2.7 — Внутригодовое распределение стока воды верхней Оби (% от годового)
[Русловые процессы и водные пути..., 2001].

Распределение стока воды														
по месяцам, %												по сезонам, %		
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	весна	лето-осень	зима
г.п. Фоминское														
1,7	1,5	1,6	9,4	18,2	21,9	14,7	11,0	8,0	6,3	3,7	2,0	49,5	40,0	10,5
г.п. Барнаул														
1,8	1,5	1,6	11,0	19,9	21,2	14,3	9,9	7,3	5,9	3,4	2,2	52,1	37,4	10,5

На характере водного режима реки отражается преобладание определенного типа ее питания, в соответствии с которым Обь, как и Бия и Катунь, относится к рекам с весенне-летним половодьем и паводками в теплое время года. Согласно классификации Б.Д. Зайкова [1937], река принадлежит к алтайскому типу водного режима, с растянутым гребенчатым половодьем и осенне-зимней меженью. Половодье почти всегда характеризуется двумя отчетливо выраженными волнами. Первая — в конце апреля и начале мая, обусловленная таянием снега на равнинных и предгорных участках водосборного бассейна. Вторая — в начале-середине июня, связанная с более поздним таянием ледников и снегов горных территорий Алтая. Скорость прохождения волны половодья достаточно велика и составляет около 70–90 км в сутки. В зависимости от года, на верхней Оби первый максимум высоты половодья либо незначительно больше наивысшего уровня второй волны, либо уступает ему [Русловые процессы и водные

пути..., 2001]. Экстремальные гидрометеорологические условия, связанные с прохождением ливневых осадков, могут способствовать возникновению паводков практически в любое время с апреля по сентябрь. Меженный период наступает в основном в сентябре, а в отдельные сильно засушливые годы — в августе (табл. 2.8). Переход от уровня половодья к меженному уровню постепенный, максимальные скорости спада не превышают 50 см/сут. [Русловые процессы, 1996].

Таблица 2.8 — Характеристики стока половодья и летне-осенней межени на верхней Оби [Русловые процессы и водные пути., 2001].

<i>Половодье</i>						
Гидрологический пост	Дата			Продолжительно-сть, сутки	Наибольший расход, м ³ /с	Сток, % годового
	начала	наиб. расхода	окончания			
Фоминское	16.04	27.05	28.07	104	5310	49,5
Барнаул	06.04	18.05	31.07	117	5460	52,1
<i>Летне-осенняя межень</i>						
	начала	наим. расхода	окончания	Продолжительно-сть, сутки	Средний расход, м ³ /с	Сток, % годового
Фоминское	11.09	19.10	31.10	51	821	40,0
Барнаул	09.09	16.10	27.10	49	935	37,4

Уровенный режим. Уровни воды на верхней Оби в соответствии с внутригодовым колебанием стока обладают большой изменчивостью. Максимальные уровни соответствуют периоду половодья, при этом скорость подъема может достигать 150 см/сутки, а продолжительность в среднем от 10 до 30 дней. Спад половодья характеризуется более медленными скоростями, при этом нередко наблюдаются повышения уровней в связи с прохождением паводков — интенсивность колебания уровней на спаде до 80 мм/сутки. Максимальные уровни имеют обеспеченность 1–2 %, наименьшие фиксируются к концу октября, когда подавляющую долю в структуре питания занимает грунтовое (подземное). В зимний период наиболее низкие уровни приурочены к окончанию зимней межени — концу марта — началу апреля. Амплитуда колебаний в среднем составляет 4–6, максимально до 7,9 м (табл. 2.9).

Таблица 2.9 — Характерные уровни воды верхней Оби [Русловые процессы и водные пути., 2001].

Уровень воды	Дата наступления уровня			Отметка уровня воды относительно нуля графика гидрологического поста, см		
	Ранняя	Средняя	Поздняя	Наим.	Средняя	Наиб.
<i>г.п. Фоминское</i>						
Макс. весенний	11 апр.	16 мая	12 июн.	193	305	505
Мин. меженный	6 сен.	1 окт.	11 ноя.	-18	18	71
Макс летне-осенний	1 июл.	20 авг.	1 ноя.	70	138	257
<i>г.п. Усть-Чарышская Пристань</i>						
Макс. весенний	11 апр.	17 мая	23 июн.	449	544	652
Мин. меженный	7 сен.	24 окт.	17 ноя.	140	192	276
Макс летне-осенний	2 июл.	25 авг.	30 окт.	251	355	493
<i>г.п. Барнаул</i>						
Макс. весенний	13 апр.	20 май	16 июн.	350	568	763
Мин. меженный	2 сен.	23 окт.	17 ноя.	-15	69	222
Макс летне-осенний	2 июл.	23 авг.	4 ноя.	113	307	477

Растянутое весеннее половодье, повышенный сток летнего периода, осложняемый паводками, а также низкая зимняя межень находят отражение в годовом изменении уровней верхней Оби и приустьевых участков Бии и Катунь (рис. 2.5). Четко выделяются две волны половодья, причем максимум второй волны нередко превышает первый, особенно на участке выше устья Чарыша.

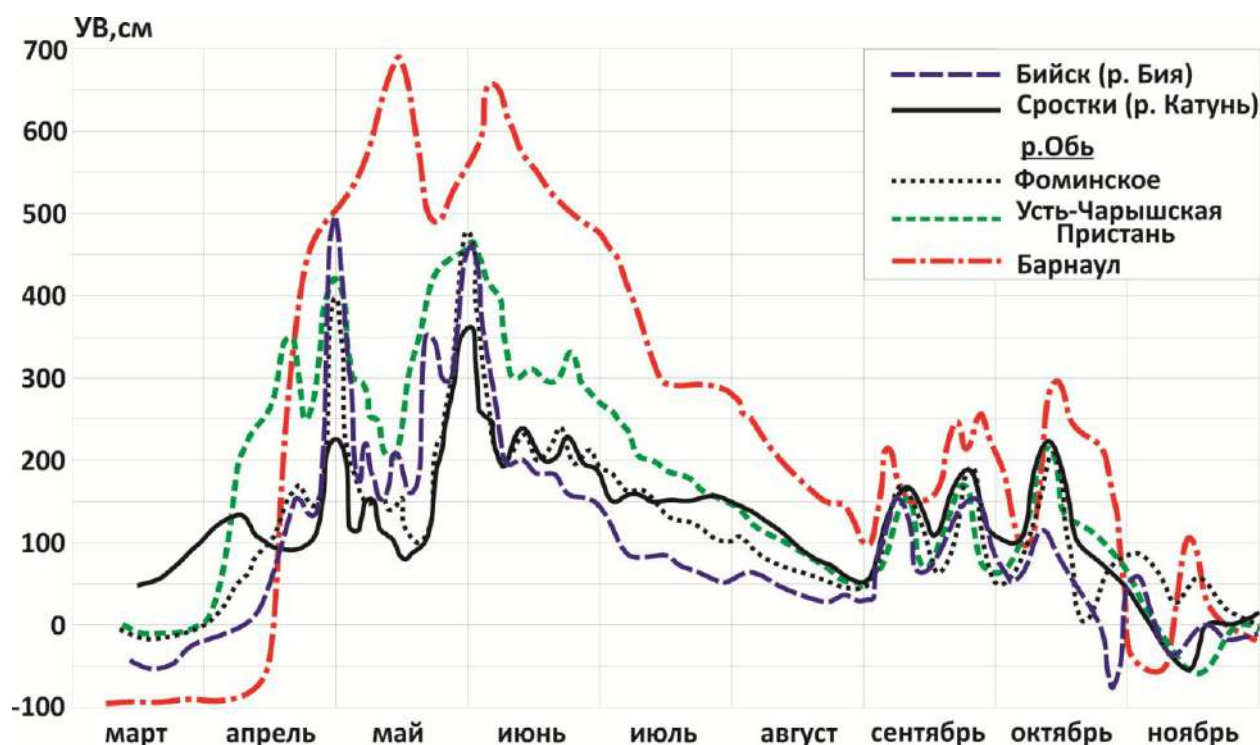


Рисунок 2.5 — График хода ежедневных уровней воды р. Оби и приустьевых участков Бии и Катунь в течение года по данным гидрологических постов Алтайского края.

Ледовый режим. На верхней Оби ледовый режим оказывает значительное влияние на русловые процессы, несмотря на небольшую относительную величину участка и общее южное расположение. Замерзание реки на участке происходит снизу вверх по течению, при этом нередко ледостав сопровождается образованием торосов, которые могут вызывать кратковременные подъемы уровня воды [Русловые процессы ..., 1996]. В среднем продолжительность установления ледостава составляет от 12 до 25 дней, его начало приходится в среднем на вторую декаду ноября, наиболее ранний возможный период — последняя декада октября. Вскрытие реки происходит с 15 по 22 апреля, в отдельные годы — в первой декаде мая. Продолжительность весеннего ледохода составляет 7–12 суток. Вскрытие приустьевых участков рек Бии и Катунь и, соответственно, освобождение ото льда узла слияния происходит раньше, чем в объединенном русле. Благодаря высокой интенсивности подъема уровней ледоход проходит достаточно быстро и до затопления поймы, поэтому его эрозионная работа проявляется лишь на островах в основном русле реки.

Общая продолжительность существования устойчивого ледяного покрова в среднем составляет 155–165 дней, при этом его мощность изменяется год от года, своих наибольших значений она достигает обычно к первой декаде апреля (до 75–85 см, макс. — 125 см). Наименьшая общая продолжительность периода с ледовыми явлениями, включая

ледостав и ледоход, наблюдалась в 2013–2014 гг. (155 сут.), наибольшая — в 1915–1916 гг. (215 сут.).

Расход наносов. На период весеннего половодья приходится пик мутности воды и максимальный сток взвешенных наносов. В течение около 1,5 месяцев активного снеготаяния и поступления наносов вместе с тальми снеговыми водами в русло (апрель–май) проходит до 80 % годового стока взвешенных наносов, и в этот период расход взвешенных наносов в 5–10 раз превышает среднегодовые значения. При этом основная доля стока взвешенных наносов — руслового происхождения и является продуктом размыва рекой берегов, сложенных легкоразмываемыми породами. С этим связано резкое (почти в 2 раза) повышение мутности ниже устья р. Чарыш, когда русло начинает подмывать уступы левобережного Степного плато (табл. 2.10).

Оценка расхода влекомых наносов произведена по методике Н.И. Алексеевского [1987], основанной на структуре и скоростях движения грядовых форм руслового рельефа. Соотношение стока влекомых наносов к общему стоку по длине Оби меняется. Непосредственно ниже слияния Бии и Катунь (несмотря на высокий сток взвешенных наносов на последней) доля влекомых составляет 11,5 %, ниже по течению она сокращается почти в 2 раза (у г. Барнаул)

Таблица 2.10 — Характеристики стока взвешенных и влекомых наносов на верхней Оби.

Форма транспорта	Сток наносов, млн. т/год		
	Период межени	Период половодья	Средний многолетний
г.п. Фоминское			
Взвешенные наносы [Русловые процессы..., 2001]	0,47	4,53	5,0
Влекомые наносы [Лю Шугуан, 1998]	0,46	0,19	0,65
Суммарный сток	0,93	4,72	5,65
г.п. Барнаул			
Взвешенные наносы [Русловые процессы..., 2001]	1,1	7,0	8,1
Влекомые наносы [Лю Шугуан, 1998]	0,44	0,13	0,57
Суммарный сток	1,54	7,13	8,67

Руслоформирующие расходы. Интегральной характеристикой, отражающей не только общую водность реки, но и ее гидрологический режим, в том числе специфику транспорта наносов, является руслоформирующий расход воды. Согласно Н.И. Маккавееву [1955], он определяется как расход, при котором осуществляются наиболее существенные русловые деформации и проходит наибольший сток наносов. Верхнее течение Оби отличается существованием одного руслоформирующего расхода воды среднего интервала, обеспеченность и значения которого постепенно с ростом водности увеличиваются вниз по реке. Для г.п. Фоминское эпюра руслоформирующих расходов образует пик в интервале от 1750 до 5000 м³/с, с максимумом 2950 м³/с (рис. 2.6,А). Вероятность достижения расходов данного интервала при этом составляет 12–15 %. Для г.п. Барнаул максимум эпюры наблюдается при расходе 3750 м³/с (рис 2.6,Б) [Русловые процессы и водные пути ..., 2001].

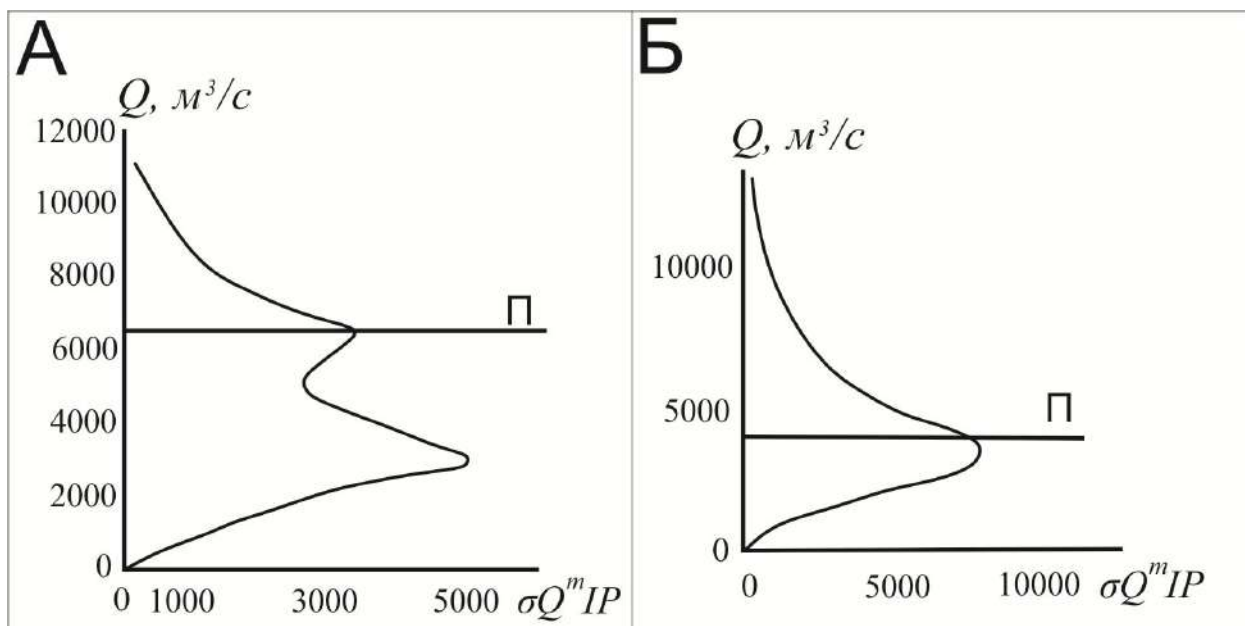


Рисунок 2.6 — Характерные эпюры руслоформирующих расходов воды для верхнего течения Оби на гидропостах: А — Фоминское; Б — Барнаул. [Русловые процессы и водные пути..., 2001].

Характерной особенностью прохождения руслоформирующих расходов является его прохождение ниже т.н. «линии поймы», следствием чего является консолидированная, нерасчлененная протоками пойма.

2.3. Условия формирования широкопойменного русла р. Лены.

2.3.1. Геолого-геоморфологические условия формирования русла Лены

Бассейн р. Лены в геологическом отношении принадлежит к докембрийской Сибирской платформе. На всем протяжении верхнего и части среднего течения она протекает вдоль Северо-Байкальского нагорья и далее почти до г. Покровска между Приленским плато справа и северной частью Алданского нагорья слева, характеризуясь врезанным руслом. Ниже г. Покровска река входит в пределы Центрально-Якутской низменности, ширина днища долины возрастает. Ниже по течению низменность ограничивается с востока отрогами Верхоянского хребта, который максимально близко подходит к руслу в районе устья Вилюя. Охватывая часть нижней Лены, широкопойменное русло протягивается вплоть до с. Жиганск, ниже которого формируется относительно прямолинейное неразветвленное русло — Ленская «труба», — переходящее в обширную дельту (рис. 2.7).

Долина р. Лены в среднем течении обрамляет крупную геологическую структуру Азии — Сибирскую платформу, проходя по ее южной, юго-восточной и восточной окраинам. Ниже впадения р. Олекмы (1296 км) она попадает в пределы Лено-Алданского сводового поднятия, расположенного на северном склоне Алданской синеклизы. Ниже происходит изменение направления течения с субширотного на субмеридиональное, и в районе г. Покровска (1725 км) Лена вступает в пределы обширной Вилюйской синеклизы, которой соответствует Центрально-Якутская низменность. В районе г. Якутска она пересекает небольшие по площади положительные структуры, фиксируемые сужениями долины возле подходящих к реке Табагинского утеса и Кангаласского камня. Ниже Кангаласского камня Лена пересекает крупную отрицательную структуру — Нижне-Алданскую впадину — и после слияния с р. Алдан долина уже нижней Лены проходит вдоль отрогов Верхоянского горного массива (хребет Омулаган) по Приверхоянскому краевому прогибу, протяженность которого составляет около 1300 км, при ширине от 45 до 170 км и мощности отложений порядка 7–8 км. Прогиб, в свою очередь, осложнен множеством локальных структур. Ширина долины в целом зависит от тектонической структуры, в пределах которой она расположена. Пересекая поднятия и выступы она сужается, уменьшается ширина русла и поймы, в пределах впадин — расширяется, хотя на всем протяжении реки ниже г. Покровска и до с. Жиганск русло — широкопойменное, поток расплывается, образуя разветвления сложных морфодинамических типов. При суммарной (вместе с островами) ширине русла выше устья Алдана 6–9 км ширина поймы относительно выдержана (от 16 до 22 км), соотношении между ними 1:2,5–1:3,5; на

нижней Лене это соотношение минимально для широкопойменного русла — 1:2–1:3 при ширине русла от 12 до 28 км (максимальная на Лене в Черпальском разветвлении русла).

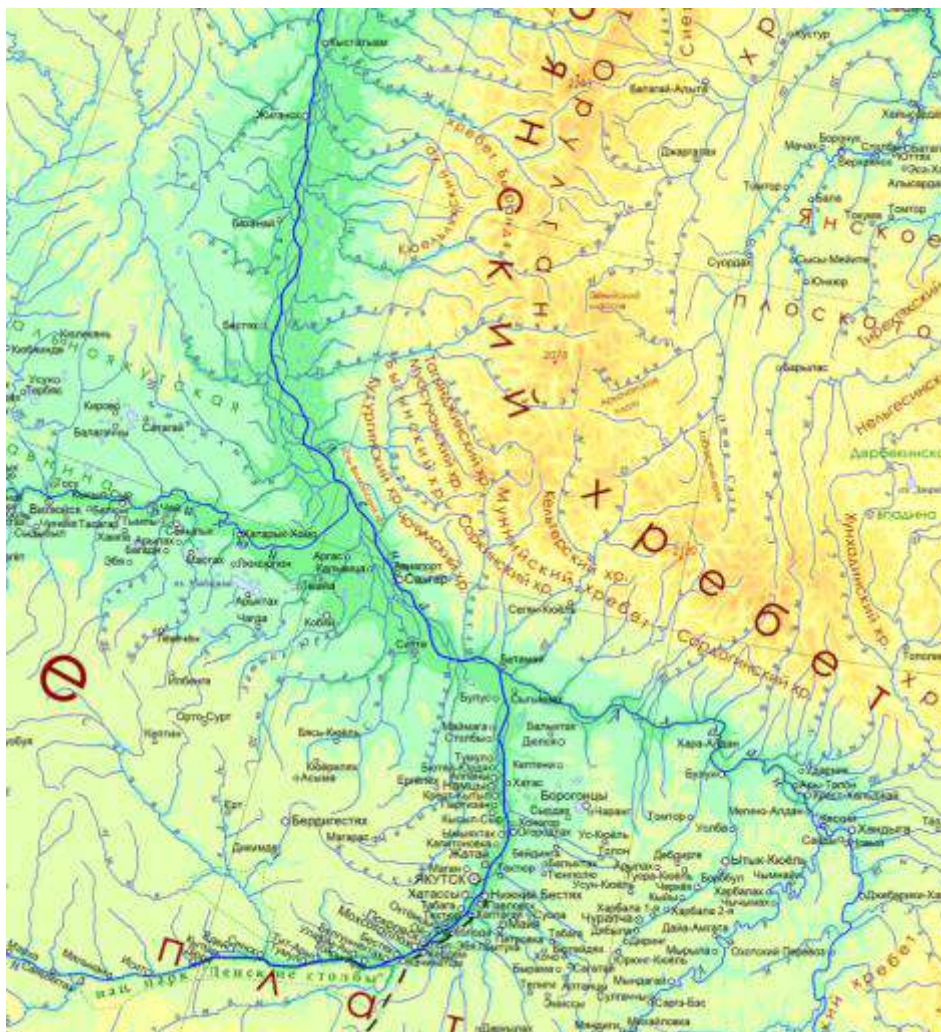


Рисунок 2.7 — Фрагмент физической карты Республики Саха (Якутии), охватывающий участок исследования [<https://www.sharada.ru>].

На средней и нижней Лене от г. Покровска до с. Жиганск развито несколько комплексов пород различного возраста. Крутой левый берег у г. Покровска сложен плотными окремнелыми кембрийскими известняками. Ниже по течению они погружаются под урез и перекрываются более молодыми слаболитифицированными меловыми песчаниками. Сужающие днище долины выступы — Табагинский утес и Кангаласский Камень (в районе г. Якутска), отроги горных хребтов вдоль правого берега в районе устья Вилюя (рис. 2.8), сложены преимущественно верхнемеловыми породами. Их выходы наблюдаются также по правому берегу реки между устьями Вилюя и Алдана у п. Сангары (1315 км). Слаболитифицированные меловые осадки, широко представленные на нижней и частично средней Лене легко подвергаются размыву и при намокании быстро формируют рыхлые отложения (алевриты и пески различной крупности).

К наиболее молодым отложениям нижней Лены относятся позднеплиоценовые песчано-гравийные толщи, распространенные на левобережье у устья Алдана (в пределах Нижне-Алданской впадины) и на участке выше с. Жиганск (1095–850 км). Четвертичные осадки (преимущественно озерно-ледникового и аллювиального генезиса) широко распространены на всех участках по всей длине долины.

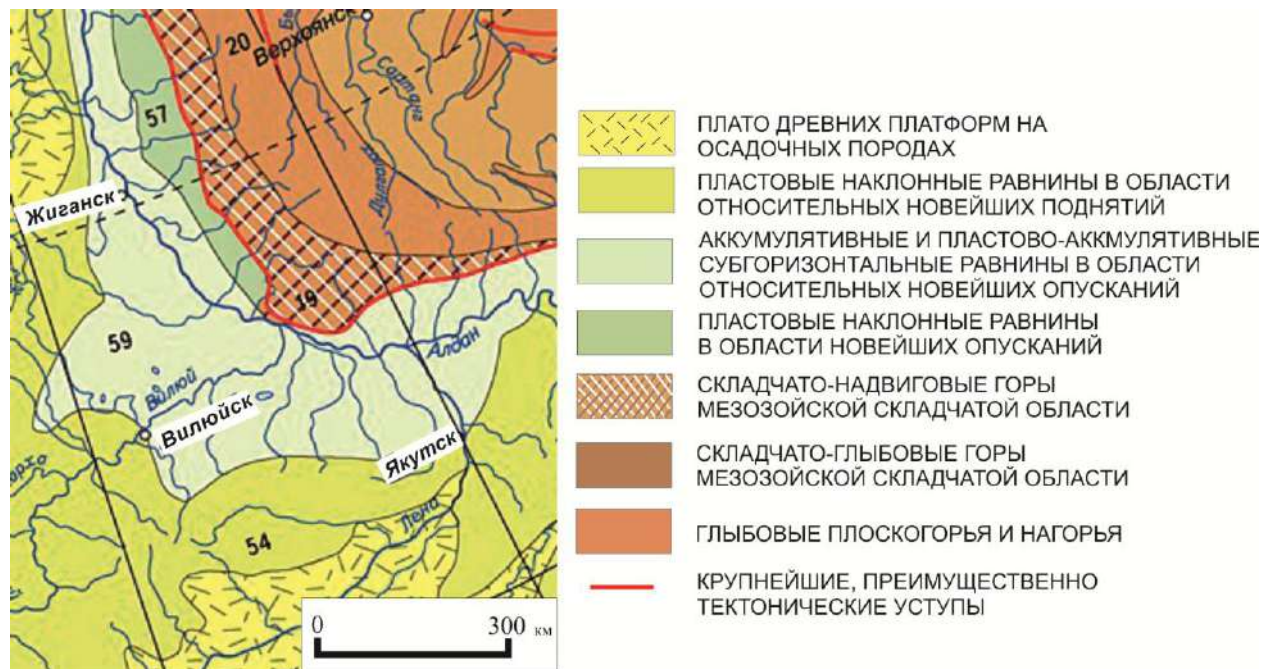


Рисунок 2.8 — Фрагмент геоморфологической карты России [2011] на рассматриваемый участок бассейна р. Лены.

В геоморфологическом отношении ниже г. Покровска структурно-денудационные равнины сменяются наклонными денудационными, охватывающими большую часть междуречья (в частности, от правой прибрежной части междуречья они простираются вплоть до долины р. Амги). Ниже Табагинского мыса распространены пластово-аккумулятивные, субгоризонтальные равнины, созданные преимущественно новейшими опусканиями на рыхлых неоген-четвертичных отложениях. Они распространены на всем участке до устья Алдана и ниже по течению — по левому берегу. Правый берег ниже слияния с Алданом представлен денудационно-тектоническими складчатоглыбовыми предгорьями и кряжами, переходящими в районе устья Вилюя в структурно-денудационные складчато-глыбовые предгорья (отроги Верхоянского хребта). По мере их удаления от русла вдоль правого берега ниже устья Вилюя (перекаты Рысий, Сахам, Медвежий, Виноградный) вплоть до Жиганска развиты субгоризонтальные пластово-аккумулятивные равнины, созданные преимущественно опусканиями в зоне сочленения с орогенной областью мезозойского складчатого комплекса Верхоянского хребта.

Долина Лены между г. Покровском и с. Жиганск постепенно расширяется; особенно резко увеличение ширины происходит ниже г. Якутска: если в районе г. Покровска ее ширина не превышает 25–30 км, то уже в 200–250 км ниже (в районе устья Алдана) она достигает 140 км. Террасы на средней и нижней Лене встречаются в основном в расширениях долины, а также наиболее часто приурочены к резким изгибам береговой линии или к местам впадения притоков. По левобережью на всем протяжении участка вплоть до устья Вилюя (1250 км) прослеживается цокольная *высокая терраса*, относительная высота которой над меженным урезом воды колеблется от 90 до 120 м (постепенно увеличивается вниз по течению), перекрытая с поверхности суглинистыми отложениями. Ниже устья Вилюя этот террасовый уровень прослеживается и на правобережье. Однако на участке от Покровска до устья Алдана ее высота несколько снижается, и она, сливаясь с другими поверхностями, становится при выходе в Нижне-Алданскую впадину (перед слиянием с Алданом), аккумулятивной.

На средней Лене (до слияния с Алданом) морфологически хорошо выражена более низкая Бестяхская терраса, высотой 35–60 м, слагаемая главным образом мощной толщей песчаных отложений (рис. 2.9).



Рисунок 2.9 — Вид с «Бестяхской» террасы на русло р. Лены. Фото автора.

Ее высота постепенно снижается к Песчаной горе (1525 км), подошва погружается под урез. Она протягивается вдоль правого берега от района г. Покровска до устья Алдана (исключая небольшой 25-километровый участок непосредственно перед узлом слияния). Особенностью ее строения является изменение крупности слагающего ее аллювия в зависимости от морфологии долины (в сужениях или расширениях). В сужениях, связанных с выходами коренных пород по левому берегу в районе г. Покровска,

Табагинского утеса, Кангаласского камня, появляются прослой крупного песка, в то время как в расширениях песок преимущественно мелко- и среднезернистый (последний является преобладающим типом руслообразующих наносов на участке). Более низкая (*вторая*) *надпойменная терраса* возвышается в среднем на 22–25 м над меженным урезом, на участке выше устья Алдана встречается в основном в виде останцов среди первой надпойменной террасы, осложняя ее рельеф. Исключение составляет небольшой участок выше Якутска, где прослеживается полноценный фрагмент этой террасы.

Первая надпойменная терраса имеет 2–3 высотных уровня, разделенных небольшими уступами, нечетко проявляющимися в рельефе, высоты которых изменяются от 11 до 16 м над урезом (соответственно относительный перепад высот между ними не превышает 4–5 м). При относительно небольшой ширине (3–5 км), эта терраса достаточно распространена по левому и правому берегам между Покровском и Песчаной горой (1525 км), выклиниваясь только в местах сужения днища долины до 3–4 км (Табагинский утес). Во многих местах она прислонена непосредственно к уступу высокой 100-метровой террасы. Начиная от отрогов Верхоянского хребта ниже устья Вилюя она встречается в основном вдоль левого берега, приобретая здесь большую ширину (до 10 км), в то время как на левобережье она встречается фрагментарно.

Ниже устья Алдана и до устья Вилюя развита 90–100-метровая терраса, сложенная плиоцен-четвертичными песками, местами с прослоями гравийного и мелкогалечного материала. Ближе к устью Вилюя над урезом возвышается цоколь данной террасы, сложенный слабо литифицированными меловыми песчаниками. Непосредственно к подошве этой террасы примыкает пойма или, реже, *первая надпойменная терраса*, которая здесь имеет относительную высоту 9–12 м. По правобережью протягивается 35–40-метровая аккумулятивная терраса, перекрытая сверху лессовидными супесями мощностью до 15–20 м. Иногда в устьях небольших притоков непосредственно к урезу выходит первая надпойменная терраса, однако ее распространение здесь не характерно. К устью Вилюя долина сужается, стесняясь отрогами Верхоянского хребта (Чочумский, Усть-Вилюйский хребты), которые по правобережью отделены от русла лишь узкой полосой разновозрастных террас; по левобережью распространение террас больше, но в основном это низкие песчаные террасы. В устье Вилюя по его правому берегу возвышается ряд останцов террас более высоких уровней, с, как правило, приподнятыми над меженным урезом воды цоколями. Ниже устья Вилюя до Жиганска по левобережью встречается в основном первая надпойменная терраса; на правобережье по мере удаления склонов хребтов прослеживается ряд низких террас. Аллювий правобережных террас

здесь преимущественно галечный, изредка встречаются линзы и прослой песка, в основном крупнозернистого.

В пределах Центрально-Якутской низменности преобладает двусторонняя пойма высотой над урезом от 2,5 до 5,5 м, прерываемая выходами коренных массивов (Табагинский, Кангаласский мысы), окаймляющих долину реки. Ниже устья Алдана развита в основном левобережная пойма, в то время как вдоль правого берега она встречается эпизодически. На нижней Лене отроги горных хребтов, подходящих к руслу со стороны правого берега, препятствуют формированию широкой поймы. Вдоль правого берега она встречается здесь небольшими фрагментами (например, в устье р. Лямпушки), а ее высота составляет 5–6 м. В отличие от правобережной, пойма по левому берегу развита очень хорошо, ее ширина достигает 12–14 км. Высота левобережной поймы — 5–7 м, на всем протяжении она представляет собой плоскую заболоченную и заозеренную поверхность. Различные высотные ступени, характерные для других участков Лены, здесь отсутствуют, лишь кое-где, в прирусловой ее части встречаются сравнительно небольшие участки более молодой и низкой поймы, зачатую находящейся на стадии формирования. Ее рельеф несет на себе еще не сглаженные экзогенными процессами следы проток, характерные для ложбинно-островной поймы.

В целом для поймы Лены характерно развитие пойменных протоков, что связано с прохождением руслоформирующих расходов при затопленной пойме. Наиболее развиты они в тыловых частях поймы, расчлняя ее вместе с многочисленными озерами на отдельные массивы. Активизация таких протоков наблюдается только в периоды повышенной водности, в межень же многие из них теряют связь с основным руслом или полностью пересыхают.

2.3.2. Гидрологический режим средней и нижней Лены.

Гидрологический режим. Несмотря на то, что река Лена является одной из крупнейших рек России как по длине, так и по площади водосборного бассейна, регулярные гидрологические наблюдения проводятся на небольшом количестве гидрологических постов, удаленных друг от друга на значительное расстояние. Наиболее высока их плотность в районе г. Якутска, где, помимо наблюдений за уровнями и температурой воды, толщиной льда и снежного покрова, на г.п. Табага ведутся регулярные измерения расходов воды. Часть из действующих гидрологических постов функционирует только в период повышения уровней в половодье с 1 по 31 мая (например, г.п. Намцы). Всего на рассматриваемом участке действует семь гидрологических постов

(рис. 2.10), из которых только на двух проводятся регулярные наблюдения за расходами воды.



Рисунок 2.10 — Схема бассейна р. Лена с указанием положения гидрологических постов.
[основа – <https://bigenc.ru/>].

Суммарный годовой сток р. Лены составляет порядка 520 км³/год, что соответствует среднемуголетнему расходу в устье $\approx 17\,000$ м³/с. Водность по длине реки изменяется значительно, возрастая в устье почти в 2,5 раза по сравнению со средним течением. За период наблюдений значения среднегодового расхода Лены менялись в пределах от 5030 до 10 500 м³/с в районе с. Табага и от 12 700 до 23 100 м³/с в районе с. Кюсюр (рис. 2.11). Средний за многолетний период годовой расход воды в створе г.п. Табага составляет 7260 м³/с, г.п. Кюсюр — 16 900 м³/с. Для г.п. Сангары, расположенного ниже слияния с р. Алдан, которая дает до 35 % от стока Лены, среднемуголетний расход составляет 12 600 м³/с. Средний минимальный расход воды в период летней межени составляет 6180 м³/с в створе с. Табага и 17500 м³/с в створе с. Кюсюр. Максимальные годовые расходы воды наблюдаются преимущественно в период весеннего половодья. Средняя дата для г.п. Табага (1938–2019 гг.) — 3 июня, для г.п. Кюсюр (1935–2018 гг.) — 6 июня. Наибольшие значения наблюдались в створе г.п. Табага 24 мая 1966 г. (50 900

м³/с), г.п. Кюсюр — 4 июня 1989 г. (< 215 000 м³/с). Среднее значение минимальных расходов воды открытого русла за период наблюдений на г.п. Табага составляет 6180 м³/с, г.п. Кюсюр — 17500 м³/с. На г.п. Табага минимальные расходы воды в период открытого русла наблюдаются преимущественно в октябре, ранняя дата — 21 июля (в 1979 г.), поздняя — 23 октября (в 2018 г.). На г.п. Кюсюр ранняя дата наступления минимального расхода в период открытого русла — 1 августа (в 1935 г.), поздняя — 14 октября (в 1945 г.). Наименьшие значения наблюдались на г.п. Табага 24 августа 1985 г. (3790 м³/с), на г.п. Кюсюр — 20 сентября 1964 г. (9800 м³/с). Среднее значение минимального зимнего расхода воды в створе с. Табага — 924 м³/с, в створе с. Кюсюр — 1570 м³/с. Наименьшие годовые значения расхода, измеренные на г.п. Табага, — 569 м³/с (7 февраля 1975 г.), на г.п. Кюсюр — 645 м³/с (15 апреля 1965 г.). В последние годы существует тренд повышения среднегодовых расходов на нижней и особенно средней Лене, что было выявлено и обосновано Д.В. Магрицким [2015].

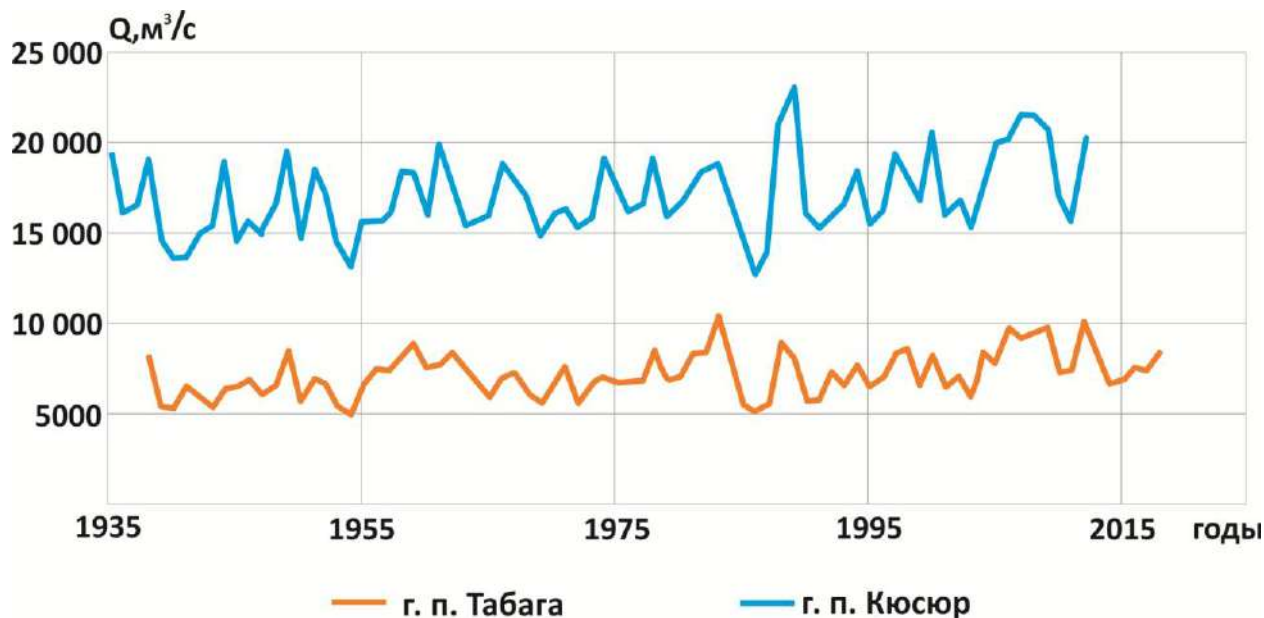


Рисунок 2.11 — Изменение среднегодовых расходов р. Лена за период 1935–2016 гг.

Водный режим р. Лены формируется в условиях исключительно сурового, резко континентального климата и сплошного распространения многолетней мерзлоты. Питание реки — смешанное с преобладанием снегового (для средней Лены этот показатель составляет 55 % от общей доли стока, для нижней — превышает 60 %). Дождевое питание несколько больше грунтового, доля последнего составляет около 15 %, в то время как на дождевое в отдельные годы может приходиться до 35 % от общего. Во многом это связано с влиянием вечной мерзлоты, которая ограничивает поступление в почву атмосферных осадков, тем самым снижая долю грунтового питания. В летний период часты повышения уровней воды — дождевые паводки, формирующиеся на крупных притоках в верхней

(Витим, Олекма) и средней (Алдан) частях бассейна Лены и связанные с муссонными дождями, приходящими с Тихого океана. Таким образом, годовое колебание стока воды Лены характеризуется крайне низкой зимней меженью, резким и высоким подъемом расходов воды в период половодья и относительно высокой летне-осенней меженью, прерывающейся дождевыми паводками (рис. 2.12), что соответствует Восточно-Сибирскому типу водного режима (по классификации Б.Д. Зайкова).

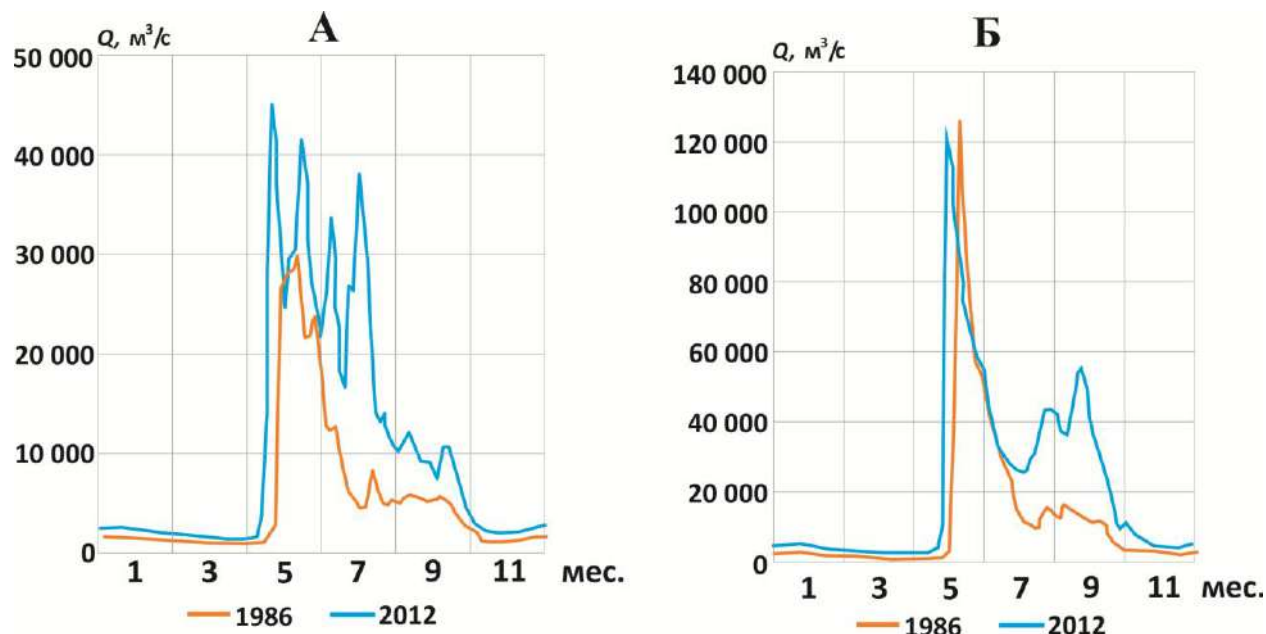


Рисунок 2.12 — Характерные гидрографы р. Лены по данным: а — г.п. Табага (1527 км); б — г.п. Кюсюр (211 км).

Уровенный режим. Многолетняя мерзлота и климатические факторы обуславливают особенности формирования волны половодья. Снежный покров ложится на мерзлый грунт, который образует мощный водоупор. Весной из-за быстрого роста температур воздуха и интенсивного таяния снега, при наличии водоупора талые воды быстро поступают в речную сеть, образуя высокое и резкое половодье [Водные пути..., 1995]. Весеннее половодье начинается в среднем в створе г.п. Табага 5 мая, в с. Кюсюр — 18 мая, оно характеризуется резким подъемом уровней, интенсивность которого увеличивается вниз по течению, возрастая от 200–250 см/сутки до 500–600 см/сутки. В такой же зависимости находятся и средние годовые амплитуды колебания уровней, которые на нижней Лене (г.п. Жиганск) могут достигать 1250 см (при амплитуде на средней Лене — 880–920 см) — рис. 2.13. На многолетний ход уровней могут оказывать влияние заторные явления, которые широко распространены на Лене, на уровенный режим также влияет и подпор в узлах слияния с крупными притоками — Алданом и Вилюем [Русловой режим..., 1976]. Подъем уровней в период летних паводков в отдельные годы может достигать 7 м и более: так, в период 17–23 июля 2017 г. в районе

г.п. Табага на средней Лене в уровни поднимались на 1,4–1,5 м в течение суток и в достаточно короткое время достигли уровня 883 см от нуля графика поста.

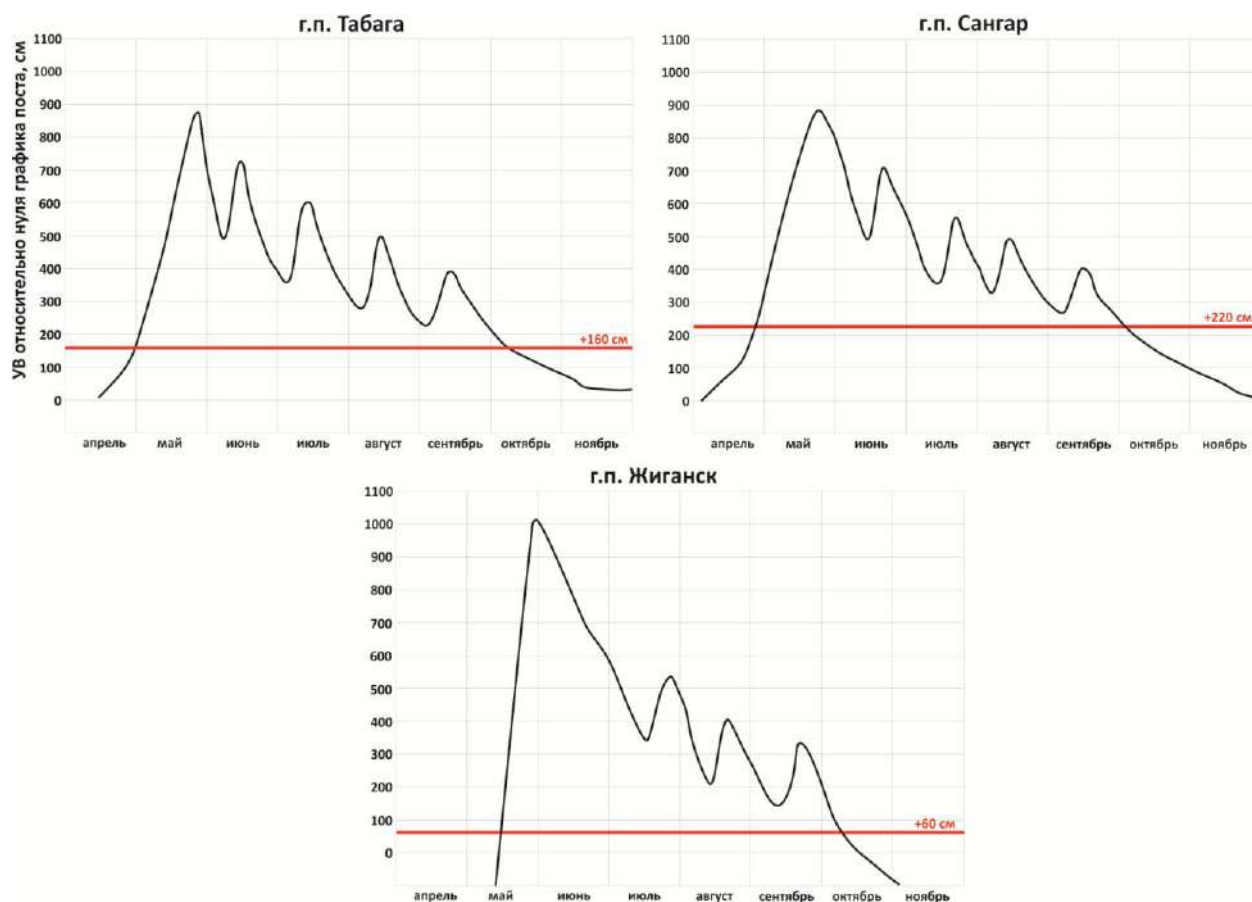


Рисунок 2.13 — Графики хода уровней воды на гидрологических постах средней и нижней Лены.

Дождевые паводки на р. Лене формируются еще на спаде половодья, колебания уровней при их прохождении достигают 4–5 м. В отдельные годы паводочный период «сливается» с периодом половодья, образуя единую волну многоводной фазы режима. Минимальные значения расходов воды в летний период наблюдаются с конца июля до конца октября. Средняя дата наступления минимального расхода воды в летний период по г.п. Табага — 20 сентября, по г.п. Кюсюр — 15 сентября. Ход уровней воды за конкретный период, представлен на рис. 2.14, который отражает их изменение по результатам наблюдений с конца мая до начала сентября 2020 г. Таблица 2.11 дает многолетнюю характеристику уровней воды по данным трех гидропостов на участке.

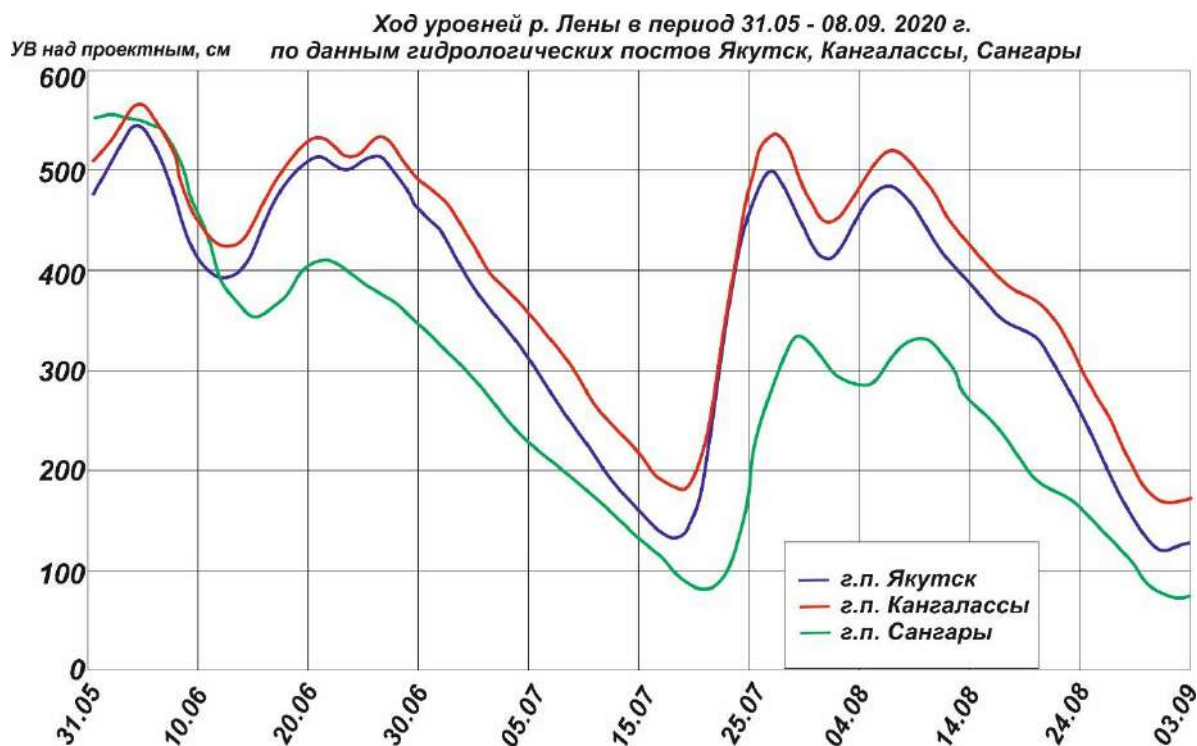


Рисунок 2.14 — График хода уровней воды (в см над «0» поста) по данным гидропостов за период навигации 2020 г. (31.05–03.09.2020 г.)

Таблица 2.11 — Характеристика минимальных и максимальных летних уровней воды [Данные гидропостов].

Пункт наблюдения	Хар-ка уровня	Макс. летний уровень		Мин. летний уровень		Амплитуда, м
		$H_{\text{макс.}}$	Дата	$H_{\text{мин.}}$	Дата	
Табага	средн.	883	—	203	—	8,8
	высш.	1239	20.05.2010	367	10.10.1983	11,6
	низш.	654	12.06.1948	64	24.08.1985	6,7
Якутск	средн.	668	—	80	—	9,3
	высш.	917	22.05.2001	229	12.08.1949	12,7
	низш.	434	12.06.1948	58	24-25.08.1985	6,6
Кангалассы	средн.	925	—	171	—	9,3
	высш.	1337	22.05.2001	300	21-22.08.1987	12,2
	низш.	630	19.05.1939	37	26.08.1985	6,2

Ледовый режим. Суровые климатические условия определяют продолжительный период ледовых явлений на реке, характеризующейся устойчивым ледоставом на протяжении большей части года. Продолжительность периода с ледовыми явлениями и

ледоставом растёт в соответствии с климатическими особенностями по длине реки к устью. Средняя продолжительность периода с ледовыми явлениями составляет от 224 суток в створе г. Якутска до 235 и более суток у с. Жиганск. Наибольшая продолжительность периода с ледовыми явлениями наблюдалась зимой 1957–1958 г. и составила, по данным г.п. Жиганск, 256 суток. Замерзание реки происходит с севера на юг, средняя его продолжительность — 15–20 дней. Толщина льда благодаря продолжительному периоду с устойчивыми отрицательными температурами в среднем превышает 1,4–1,5 м. В отдельных местах она достигает 3 м. В результате многие маловодные и мелкие протоки и рукава оказываются промерзшими до дна. Согласно общему направлению течения с юга на север вскрытие реки происходит от истоков к устью, средняя продолжительность весеннего ледохода составляет 4–9 суток, наименьшая — 3, максимальная — до 12 суток в пределах исследуемого участка. Характерной чертой весеннего ледохода являются нагромождения льда на берегах и отмелях и у оголовков островов, который в дальнейшем медленно тает. Отдельные нагромождения глыб льда в ходе экспедиционных исследований отмечались у оголовков островов вплоть до 14 июня 2018 года.

Резкий подъем расходов и уровней воды, высокие скорости течения, а также значительная толщина льда способствуют ежегодному образованию заторов льда на перекатах и участках разветвлений русла. Заторы на р. Лене формируются на пике первой волны половодья. Образованию катастрофических заторов способствует сочетание значительной увлажненности водосбора реки осенью, большая толщина льда, интенсивное снеготаяния весной, избыточные осадки в период формирования половодья, а также резкий контраст температур воздуха в месте образования затора и в верховьях бассейна [Бузин, 2016]. В характерных местах заторы образуются ежегодно, время их существования может исчисляться как часами, так и несколькими сутками [Зайцев и др., 2008]. Весенний ледоход и образование заторов оказывают воздействие на русло реки как за счет «вспахивания» движущимся льдом рыхлой поверхности берегов и отмелей, так и за счет резкого (вплоть до экстремального) роста скоростей течения, например при прорывах заторов. Основные места образования заторов связаны с местными сужениями русла Табагинским утесом и Кангаласским камнем, узлами разветвления русла и оголовками островов. В Хайтыалаахском узле разветвления у оголовка острова благодаря затору произошло развитие левого рукава, ставшего судоходным на протяжении почти 40 лет. Более подробные сведения о средних датах начала и окончания весеннего ледохода и осеннего ледостава приведены в табл. 2.12 [Атлас..., 1981, с дополнениями].

Таблица 2.12 — Характеристика ледового режима р. Лены за 1939–2018 гг. (на участке от г. Якутска до с. Жиганск) [climate-data.org].

Характеристика		Пункт наблюдения			
		г. Якутск	г.п. Кангалассы	г.п. Сангар	с. Жиганск
Дата появления льда	ранн.	1.10.1955	1.10.1939	2.10.1955	23.09.1957
	сред.	14.10	14.10	11.10	9.10
	позд.	22.10.1953, 1994, 2009	26.10.1947	21.10.1947	21.10.1947
Дата ледостава	ранн.	16.10.1957	20.10.1984	24.10.1983	21.10.1983
	сред.	01.11	01.11	02.11	31.10
	позд.	15.11.1997	14.11.2008	14.11.2018	11.11.1951
Макс. толщина льда, см	наим.	80	72	120	118
	сред.	126	117	171	166
	наиб.	181	172	225	210
Дата вскрытия	ранн.	07.05.1943	06.05.2014	12.05 1943, 2014	16.05 1943
	сред.	18.05	19.05	22.05	27.05
	позд.	28.05 1946,1954,1956	30.05 1946, 1954	02.06 1987	07.06 1987.
Дата очищения ото льда	ранн.	9.05.1943	13.05.2014	19.05.1943, 1987	20.05.1943, 1987
	сред.	25.05	26.05	28.05	31.05
	позд.	5.06.1946	5.06.1946	7.06.1946	10.06.1946, 2003

Расход наносов. Сток наносов на Лене отличается высокой долей влекомых (руслообразующих) наносов и спецификой формирования стока наносов в целом. Значительная залесенность водосбора, широкое распространение в его пределах устойчивых к размыву скальных и многолетнемерзлых грунтов обуславливает низкую мутность воды и, как следствие, небольшой сток взвешенных наносов в течение большей

части года. В разные фазы гидрологического режима величины мутности меняются в значительных пределах. На ее изменчивость в значительной степени влияет температурный режим деятельного слоя в пределах водосбора, в частности его устойчивость к размыву в период снеготаяния, и активный смыв дождевыми осадками после протаивания в период летних паводков, обуславливающий интенсификацию поступления материала в русло.

В зимний период расход взвешенных наносов уменьшается до 0,4–0,5 % от годового. В половодье средняя мутность составляет около 90 г/м^3 , в межень — значительно меньше. Средняя годовая мутность воды в районе г. Якутска равняется 57 г/м^3 ; среднемаксимальная, по данным наблюдений за период 1958–1977 гг., составила 180 г/м^3 . По мере продвижения к низовьям реки имеется тенденция к увеличению мутности и, соответственно, нарастанию расхода взвешенных наносов и их годового стока (табл. 2.13). Для сравнения в таблице приведены данные стока взвешенных наносов на верхней Лене (с. Солянка), где средняя мутность меньше таковой на средней Лене примерно в 2 раза.

Таблица 2.13 — Характеристики мутности, расхода наносов и их годового стока по длине р. Лены [Водные пути..., 1995].

Пункт наблюдения	Среднегодовой расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$	Мутность, г/м^3	Расход наносов, кг/с	Годовой сток, млн.т
с. Солянка (2238)	6700	27	180,9	5,7
с. Табага (1527)	7150	57	400,4	12,62
с. Кюсюр (211)	17000	50	850	26,8

Сток влекомых наносов рассчитан по методике Н.И. Алексеевского [1998], основанной на данных о размерах и скоростях смещения гряд: его среднегодовая величина — 5,45 млн. тонн, из них в межень — 0,85 млн. тонн, в половодье и паводки — 4,58 млн. тонн, что составляет 37,6 % от общего стока наносов [Чалов и др., 2000; Лю Шугуан, 1998]. Это определяет интенсивное их перемещение потоком и развитие обширных прирусловых отмелей, обсыхающих в межень.

Руслоформирующие расходы. В широком интервале изменения расходов воды Лены можно выделять диапазоны расходов, при которых в многолетнем плане наблюдается наибольший сток руслообразующих наносов и происходят наиболее интенсивные русловые деформации, т.е. руслоформирующие. Для г.п. Табага [Русловой режим средней..., 1976] были получены два максимума, соответствующие руслоформирующим расходам воды: верхний, проходящий при затоплении

средневысокой поймы, равный $24\,000\text{ м}^3/\text{с}$, имеющий обеспеченность 7% и соответствующий уровню воды по г.п. Якутск $+390\text{ см}$ и по г.п. Табага $+640\text{ см}$; нижний интервал соответствует затоплению прирусловых песчаных отмелей, равный в среднем $10\,500\text{ м}^3/\text{с}$ (при полноте «эпюры» в пределах $6000\text{--}14000\text{ м}^3/\text{с}$), имеет обеспеченность 14% и наблюдается при уровнях $+250\text{ см}$ по г.п. Якутске и $+560\text{ см}$ — по г.п. Табага [Водные пути..., 1995] (рис. 2.15,А).

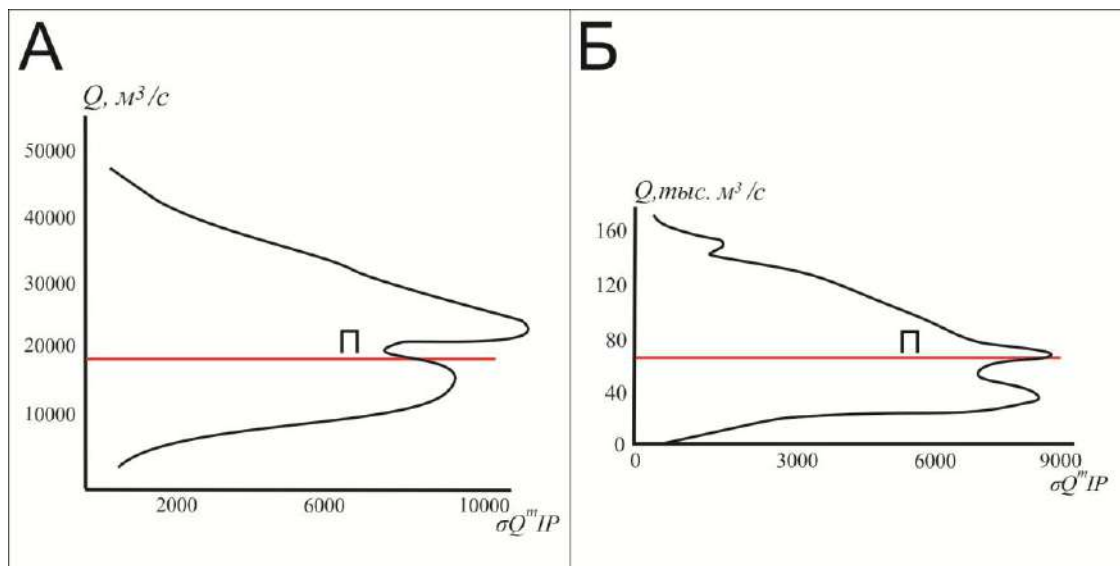


Рисунок 2.15 — Эпюра руслоформирующих расходов р. Лены: А — средней (г.п. Табага); Б — нижней (г.п. Кюсюр).

На нижней Лене (рис. 2.15, Б) большая растянутость спада весеннего половодья обуславливает значительную продолжительность этапа активных переформирований русла и специфику прохождения руслоформирующих расходов: они здесь наблюдаются в течение июня-июля (оба интервала или только верхний) и августа (нижний интервал). Чаще, чем на средней Лене, руслоформирующими являются расходы летне-осенних паводков (август-сентябрь). Данные табл. 2.14 свидетельствуют о возрастании на нижней Лене высокой обеспеченности руслоформирующих расходов нижнего интервала, в то время как расходы верхнего интервала проходят реже (их обеспеченность — 4%).

Таблица 2.14 — Сравнение значений и обеспеченности прохождения руслоформирующих расходов р. Лены [Водные пути..., 1995].

Пункт наблюдения (км с/х)	верхний максимум		нижний максимум	
	$Q, \text{м}^3/\text{с}$	%, обеспеченность	$Q, \text{м}^3/\text{с}$	%, обеспеченность
Табага (1527)	23 900	7,0	15 000	16,0
Кюсюр (211)	43 000	4,0	28 300	25,0

Мерзлота. Широкопойменное русло р. Лены формируется в зоне распространения многолетнемерзлых пород, что является его отличительной особенностью, в то время как на Оби она отсутствует, встречаясь только в самой нижней северной части бассейна. Мерзлота формируется на поймах, на островах и относительно мелководных участках русла, снижая интенсивность русловых переформирований, с одной стороны, и повышая их при интенсивном оттаивании и — с другой [Тананаев, 2007; Алексеев, 1961; Русловой режим..., 1995].

Влиянию мерзлоты на русловые переформирования посвящено немало работ. Проведенные полевые исследования еще в начале 1970-х гг. показали сцементированность мерзлотой большинства прирусловых отмелей (побочней, осередков) и мелководий. [Беркович, 1972], которые в зимний сезон промерзают на глубину 3–6 м. Общая мощность мерзлоты на данном участке составляет до 150 м, она представлена преимущественно полигонально-жильным льдом в одновозрастных отложениях (аллювиальных, болотных, озерных). Средняя температура многолетней мерзлоты составляет от -5 до -9 °С. Глубина сезонного оттаивания поверхностного слоя грунта в русле реки и на ее отмелях составляет порядка 2,2–2,6 м.

В последние годы наблюдается увеличение теплового стока Лены и деградация вечной мерзлоты. Если в середине XX века [Чистяков, 1952] мерзлые грунты располагались на глубине до 1–1.5 м от меженного уровня при толщине талого слоя 1–2 м, а на обсыхающих в межень отмелях они обнаруживались на отметках +1.8 м от проектного уровня, то буровые работы на побочнях и осередках основного русла в 2016–2017 гг., т. е. через 60 лет (с начала 1960-х годов), показали уже слабое распространение мерзлоты в русле. По этой причине на некоторых участках русла изменяется характер и направленность русловых переформирований, происходит увеличение стока наносов вследствие размыва и т.д. [Тананаев, 2004]. Основным фактором деградации мерзлоты является усиление отепляющего воздействия потока, происходящее в результате увеличения теплового стока реки. Д.В. Магрицкий [2009, 2015] оценил его для конца XX–начала XXI века в 11,3 % при увеличении продолжительности периода с температурой 0,2 °С на 8 суток. Температура воды в половодье повысилась с 1930 г. в среднем на 2 °С. По-видимому, теплового и механического воздействия потока с расходом 20–45 тыс. м³/с и температурой от 3–7 °С в мае до 14–16 °С в июле достаточно для разрушения за 3–4 недели мерзлого слоя и образования в основном русле сплошного талика. С начала 1980-х годов также отмечен рост средней температуры вечной мерзлоты в районе г. Якутска на 1 °С и увеличение мощности деятельного слоя. При этом средние температуры воздуха с 1930-х годов повысились на 2 °С, особенно заметно — после 1980 г. (на 1,2 °С). Помимо

термозрозии, преобладающими криогенными процессами в днище долины реки и на поверхностях террас и поймы являются морозобойное растрескивание, термокарст, формирование бугров пучения.

ГЛАВА 3. МОРФОДИНАМИЧЕСКИЕ ТИПЫ РАЗВЕТВЛЕННЫХ РУСЕЛ: УСЛОВИЯ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ, МОРФОМЕТРИЯ, ГИДРОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ДИНАМИКА.

3.1. Принципы классификации русловых разветвлений; место разветвленных русел в морфодинамической классификации русел МГУ.

Разветвления русел рек на рукава. Связь взаимодействия потока и русла проявляется в многообразии форм русла, как во внешнем облике, так и в их эволюции. Все это создает предпосылки для классификации речных русел, в которой внешний облик и конфигурация русла тесно связаны с его динамикой (например, разделение потока на ветви течения отражается в разветвлении самого русла на рукава и его переформированиях), обуславливая выделение морфодинамических типов русел.

Значительная доля больших и крупнейших рек в среднем и особенно в нижнем течении характеризуется руслом, разветвленным на рукава. Это связано с тем, что рост водности реки сопровождается преимущественным, по сравнению с глубиной русла h , увеличением его ширины b_p . При большом соотношении b_p/h поток сначала утрачивает форму компактной струи, образует широкую стрежневую область, а затем разделяется на обособленные ветви течения [Великанов, 1958; Карасев, 1975], между которыми происходит аккумуляция наносов, возникают осередки, превращающиеся при закреплении их растительностью в острова. Но ширина русла зависит также от его устойчивости, свободных или ограниченных (геолого-геоморфологических) условий развития русловых деформаций, сужений и расширений дна долины и самого русла, обуславливающих чередование по реке явлений подпора и гидравлического спада, изменений соотношения стока руслообразующих наносов с транспортирующей способностью потока [Чалов, 2008, 2011].

Вследствие большого разнообразия (различий в количестве и водности протоков и рукавов, размеров и форм островов, их положения в русле), разветвления нуждаются в наиболее полной классификации, которая включала бы в себя все их проявления на различных структурных уровнях [С. Чалов, 2007] и в различных условиях формирования. Принципы классификации разветвлений могут быть основаны как на количестве и взаиморасположении островов их образующих, водности разделяющих их протоков, так и на переформировании самих разветвлений во времени. Даже при схожей морфологии и особенностях динамики типизация может осложняться геолого-геоморфологическими условиями (врезанное или широкопойменное русло), крупностью руслообразующих наносов, устойчивостью и т.д. Острова могут быть представлены как единичными формами, так и формировать разветвления второго и третьего порядков в руслах любого

типа (в т.ч. в извилистых и прямолинейных), образовывать скопления островов (архипелаги). Взаиморасположение и количество островов в *узле разветвления* — основные его характеристики, определяющие относительно сходные в его пределах морфологию и темпы деформаций, морфометрические параметры, гидролого-морфологические зависимости и особенности распределения стока по рукавам.

Одним из принципов типизации может выступать положение островов и разветвлений в русле — в активной или периферической частях русла, за выступами и мысами ведущих берегов, в выбоинах берегов, на излучинах русла, в истоках и в устьях рукавов. Развитие разветвлений на разных структурных уровнях от осередкового до пойменного обуславливает закономерности переформирования на каждом из них, причем зачастую более высокие уровни включают в себя развитие более низких.

В получившей большое распространение морфодинамической классификации русел МГУ русловые разветвления в зависимости от положения образующих их островов в русле и режима русловых деформаций разделены на 11 типов, каждый из которых характеризуется своей схемой многолетних переформирований и, в свою очередь, может осложняться разветвлениями рукавов 2-го и 3-го порядков. Разветвления могут формироваться также на реках с извилистым (меандрирующим) руслом (в привершинных частях и на крыльях излучин) и в относительно прямолинейном русле, образуя разветвления 2–3-го порядков, возникают как следствие формирования прорванных излучин (когда одновременно сосуществуют и старое русло — бывшая крутая сегментная излучина — и спрямляющее ее новое русло, иногда само образующее излучины или вторичные разветвления (по терминологии ГГИ, это незавершенное меандрирование). При этом разветвления одного и того же типа не одинаковы по параметрам, положению в русле и количеству создающих их островов, различаются по устойчивости русел, их геоморфологическому типу (широкопойменные, адаптированные или врезанные русла), отличаются в зависимости от направленности и интенсивности вертикальных деформаций.

Наибольшее распространение русловые разветвления получают на реках с широкопойменным руслом, песчаным составом аллювиальных отложений, формирующимся в условиях свободного развития русловых деформаций при значительных величинах стока воды и наносов. В этих условиях разветвления образуют протяженные участки, эпизодически прерываемые относительно прямолинейным неразветвленным руслом, что, как правило, обусловлено геолого-геоморфологическими особенностями строения днища долины (расположение реки вдоль ведущего коренного берега, местные сужения днища долины, стеснение русла конусами выноса притоков и

т.д.). Ни одно русловое разветвление (кроме одиночных, встречающихся в извилистом или прямолинейном русле) невозможно рассматривать как изолированную форму проявления русловых процессов. Разветвленные участки всегда представляют собой взаимосвязанные в своем развитии, функционировании и переформировании узлы (например, цепочка параллельно-рукавных разветвлений на средней Лене в районе г. Якутска — «разбой» Якутский и Рассолода — или параллельно-рукавные разветвления на нижней Лене ниже устья Вилюя).

Главными признаками разветвления, определяющими его морфодинамический тип, являются взаимное расположение рукавов и островов — основных элементов разветвлений, — их размеры, особенности распределения стока воды (в процентном соотношении) по рукавам и водность рукавов, способность рукавов образовывать самостоятельные разветвления 2-го и 3-го порядков и тип русла самих рукавов (излучина, в которой остров образует ее шпору; разветвление; прямолинейное русло). Кроме того, каждое разветвление характеризуется тем или иным количеством образующих их островов, основных (чаще их два, но встречается три-четыре) и второстепенных рукавов (их может быть несколько) и межостровных протоков. Русла с многорукавными (двух-, трех- и более) разветвлениями, образованными архипелагами островов, а также разветвления с длинными рукавами и большим количеством соединяющих их межостровных протоков, по которым осуществляется гидравлическая связь между основными рукавами, иногда объединяют под общим термином «сложноразветвленные», чтобы подчеркнуть особенности русловых переформирований, протекающих в таких руслах.

Таким образом, в морфодинамической классификации русел МГУ разветвленные русла занимают обширный блок, составляя, наряду с меандрирующим и прямолинейным, основной морфодинамический тип русла. При этом русло каждого из типов может быть широкопойменным, адаптированным или врезанным. Развитие каждого из этих геоморфологических типов обуславливается различными геолого-геоморфологическими условиями. Критерием выделения каждого из трех геоморфологических типов служит соотношение ширины русла b_p и ширины поймы B_n [Чалов, 2008]: при $B_n > 2 \div 3b_p$ преобладают горизонтальные русловые деформации и формируются широкопойменные русла, при ширине поймы меньше ширины русла ($B_n < b_p$) преобладают вертикальные русловые деформации (врезание) и формируются врезанные русла. Промежуточное положение между врезанными и широкопойменными занимают адаптированные русла, у которых ширина поймы сопоставима с шириной русла, но $b_p < B_n \leq 2 \div 3b_p$.

Наиболее полно все подтипы разветвленного русла представлены на равнинных реках с широкопойменным руслом (табл. 3.1). Некоторые их разновидности свойственны и горным рекам. Адаптированные и врезанные русла имеют меньший набор разновидностей каждого морфодинамического типа, поскольку в этих условиях многие из них не имеют условий для своего развития. Так, на средней (выше г. Покровска) и верхней Лене разветвления встречаются почти на всей реке, имеющей врезанное русло, причем перед выходом ее в пределы Центрально-Якутской низменности находится протяженный участок врезанного русла с параллельно-рукавными разветвлениями, образованными вытянутыми вдоль реки крупными островами и островными массивами.

Таблица 3.1 — Классификация островных (русловых) разветвлений, создающих типы русла и морфологически однородные участки, и их связь с геоморфологическими и морфодинамическими типами русла, размерами реки и характеристиками разветвленности. Цветом выделены широкопойменные русла («+» — распространены, «-» — отсутствуют) [Чалов, 2008].

Русловые (островные) разветвления													
Типы разветвлений	Геоморфологические типы русел			Размер реки (по водности)			Характеристика разветвленности				Морфодинамические типы русел		
	Широкопойменные	Адаптированные	Врезанные	Большие и крупнейшие	Средние	Малые	Количество островов		Количество основных рукавов		Прямолинейные	Меандрирующие	Разветвленные
							1	> 2	1	> 2			
Одиночные простые	+	+	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+
Одиночные сложные	+	-	-	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+
Односторонние	+	+	-	+	-	-	+	-	+	-	-	-	+
Чередующиеся односторонние	+	-	-	+	-	-	+	+	+	-	-	-	+
Двусторонние	+	-	-	+	-	-	-	+	-	+	-	-	+
Разветвленно-извилистые	+	-	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	-

Сопряженные простые	+	+	+	+	+	-	-	+	-	+	-	-	+
Сопряженные сложные	+	+	-	+	-	-	-	+	-	+	-	-	+
Параллельно-рукавные	+	+	+	+	-	-	-	+	-	+	-	-	+
Разбросанные	+	+	-	-	+	+ ¹	-	+	-	+	-	-	+
В узлах слияния рек	+	+	+	+	+	-	+	+	-	+	+	-	+

¹ — В межгорных и внутригорных котловинах, в предгорьях

Таким образом, классификация разветвлений должна учитывать все структурные уровни их развития (от осередкового до пойменного): как собственно морфодинамические типы русел русловых (островных) разветвлений, так и различные их формы, проявляющиеся на более высоком или низком уровне разветвленности.

Устойчивость русла. Интенсивность русловых переформирований, развитие одних и обмеление других рукавов в разветвленном русле определяется, главным образом, устойчивостью русла. От устойчивости зависит как сам морфодинамический тип русла, так и многообразие его форм, что характерно как для верхней Оби, так и для средней и нижней Лены [Чалов, 2008]. Она, в свою очередь, зависит от крупности руслообразующих наносов, чередования расширений и сужений дна долины (геолого-геоморфологических условий) и ширины русла, которая сама является следствием устойчивости русла. Для оценки степени устойчивости русла при проведении руслового и гидролого-морфологического анализа чаще всего применяются показатели, основанные на морфометрических показателях самого русла: число Лохтина $L = d_{cp}/I$ и коэффициент стабильности Н.И. Маккавеева $K_c = d_{cp}/I \cdot b_p$, где d_{cp} — средний диаметр руслообразующих наносов, мм; I — уклон, ‰; b_p — ширина русла в пойменных бровках, м. Использование этих коэффициентов позволяет провести сравнение отдельных участков и узлов разветвления, а также определить и проанализировать изменение устойчивости по длине реки. По классификации Р.С. Чалова [2008] (табл. 3.2) верхняя Обь и средняя и нижняя Лена относятся к рекам с неустойчивыми или слабоустойчивым руслом: для Оби $L = 1,0 \div 2,5$, $K_c = 2 \div 4$ — неустойчивое, $L = 2,5 \div 5$, $K_c = 4 \div 15$ — слабоустойчивое; для средней и нижней Лены $L = 5 \div 9,5$, $K_c = 5 \div 10$ — неустойчивое ; $L > 9,5$, $K_c = 10 \div 16$ — слабоустойчивое.

Таблица 3.2 — Классификация русел рек по степени устойчивости [Чалов, 2008].

Характеристика устойчивости русла	Интенсивность русловых деформаций	Показатели устойчивости	
		L	K_c

Абсолютно неустойчивое	Очень высокая	< 1	< 2
Неустойчивое	Высокая	1 - 2,5	2 - 4
Слабоустойчивое	Повышенная	2,5 – 5	4 - 15
Относительно устойчивое	Умеренная	5 – 10	15 - 20
Устойчивое	Слабая	10 - 50	20 - 100
Абсолютно устойчивое	Отсутствует	>50	>100

Верхняя Обь характеризуется направленным возрастанием показателей степени устойчивости, при которой наименее устойчивым является верхний отрезок участка (0–54 км), соответствующий параллельно-рукавным разветвлениям (рис. 3.1). Средние значения числа Лохтина на всем отрезке изменяются от 2,3 до 3,9, а коэффициента стабильности Н.И. Маккавеева — от 2,4 до 5,9. Отдельные, наименее устойчивые узлы разветвления характеризуются значениями числа Лохтина ниже 2,1. Наибольшие значения соответствуют участку непосредственно перед впадением Чарыша, а также участкам, где во второй половине XX века регулярно производились дноуглубительные работы. Например, за счет этого устойчивость Фоминского узла (5–11 км) возросла в результате землечерпания и выправительных работ в 1970–1980 гг. Кроме того, на верхней Оби наблюдается связь ширины русла (суммарной, вместе с островами) и показателем устойчивости, при которой наиболее широким участкам соответствуют минимальные значения L и K_c . Определяющими условиями низкой устойчивости русла непосредственно ниже слияния Бии и Катунь являются резко возрастающая (в 1,5–2 раза) ширина русла, а также изменение преобладающей формы транспорта наносов. На Бие и Катунь песчаные наносы перемещаются во взвешенном состоянии, руслообразующим служит галечный аллювий; на Оби русло исключительно песчаное.

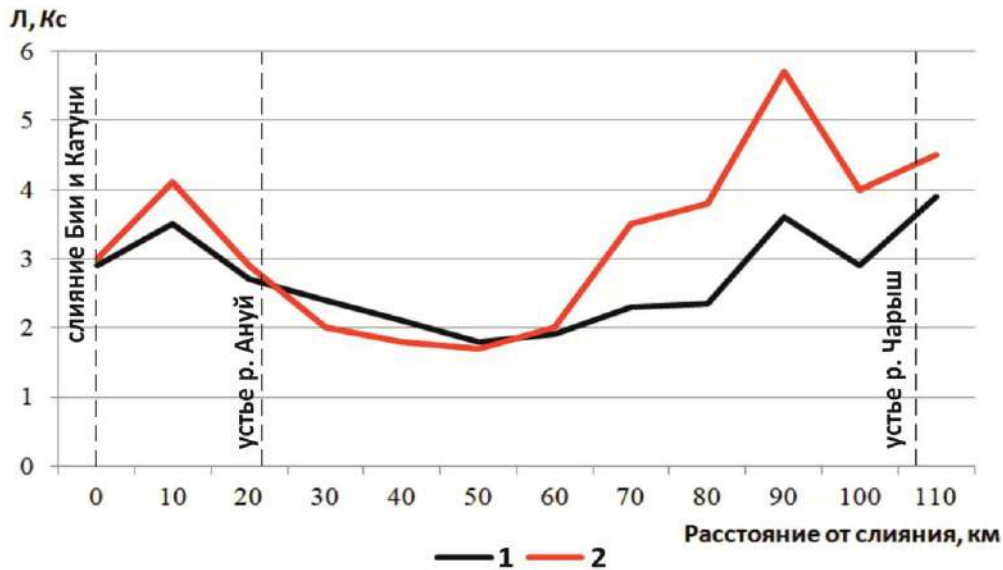


Рисунок 3.1 — Изменение показателей степени устойчивости русла (1 — L ; 2 — K_c) по длине русла верхней Оби.

Более сложно распределение показателей устойчивости на средней и нижней Лене, где наблюдается чередование участков с большей или меньшей устойчивостью (рис. 3.2). Наибольшие значения показателей отмечаются в местах стеснения днища долины бортами, сложенными коренными трудноразмываемыми породами: левый берег в районе г. Покровска, Табагинский утес, Кангаласский камень, район правого берега у п. Сангар, участок в районе впадения р. Виллюй. Им соответствуют локальное сужение днища долины русла и увеличение крупности руслообразующих наносов. Относительно более широкое русло и преобладание более мелких наносов способствует снижению его устойчивости. Таковы «разбои» Рассолода и Якутский, Хайтыалаахский, Белогорский, Черпальский, Сахам и другие узлы разветвления. Низкие показатели отмечаются также и в Приалданском участке, так как подпор от Алдана способствует снижению степени устойчивости, при этом ниже, наоборот, отмечается повышение, связанное с тем, что Алдан и некоторые другие правобережные притоки являются источниками поступления в русло более крупных наносов (преимущественно галечных). Одно из самых минимальных значений достигается в Белогорском разветвлении ($L < 3,5$), где под влиянием изгиба правого берега основной рукав уходит влево, где преобладают песчаные наносы, тогда как вдоль правого берега — более крупные, алданские, а также на всем протяжении участка ниже устья Виллюя, достигая значений $L = 1,6$, $K_c = 3,5$.

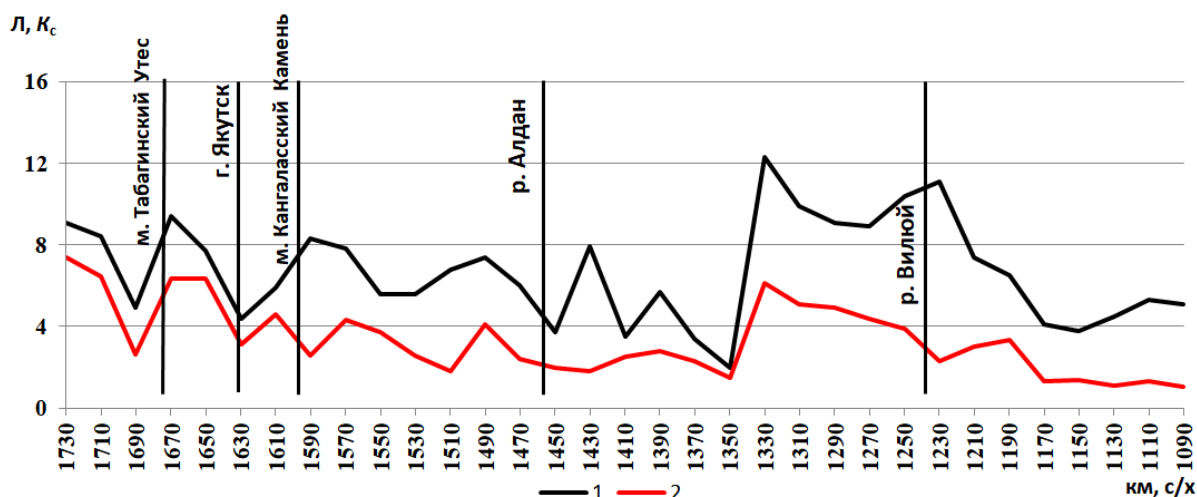


Рисунок 3.2 — Изменение показателей степени устойчивости русла (1 — Л; 2 — K_c) по длине русла средней и нижней Лены.

3.2. Разветвленное русло верхней Оби (характеристика разветвлений, динамика островов и их морфометрические параметры).

Морфодинамические типы русел. Верхняя Обь является равнинной рекой с широкопойменным руслом и абсолютным преобладанием русловых разветвлений. Несмотря на относительно небольшую протяженность (около 110 км), многообразие разветвлений на участке от слияния Бии и Катунь достаточно велико (табл. 3.3; рис.3.3).

Таблица 3.3 — Основные морфодинамические типы русла на участке верхней Оби (от слияния Бии и Катунь до устья Чарыша).

Участок, км от слияния Бии и Катунь (по судовому ходу)	Тип русла	Протяженность, км / доля в % от длины участка
0–5	Устьевое (дельта Бии и Катунь)	5/4,5
5–47	Параллельно-рукавные разветвления	42/38,2
47–72	Параллельно-рукавные, чередующиеся односторонние	25/22,7
72–77	Свободная сегментная излучина	5/4,5
77–87	Односторонние разветвления	10/9,1
87–99	Одиночные, в т.ч. сложные одиночные	12/10,9

99–110	Устьевое (дельта Чарыша)	11/10,0
Всего		110/100

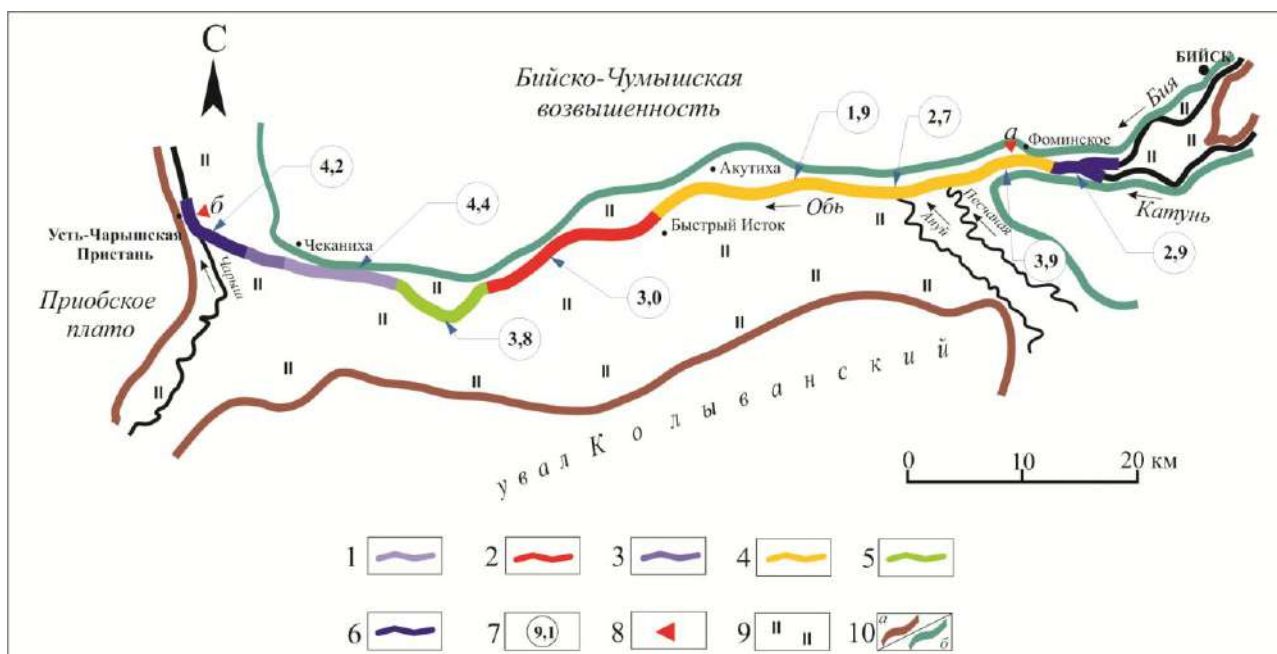


Рисунок 3.3 — Схема распространения морфодинамических типов русла и геоморфологических условий их формирования на верхней Оби: 1 – односторонние разветвления; 2 – чередующиеся односторонние разветвления; 3 – одиночные в т.ч. сложные одиночные разветвления; 4 – параллельно-рукавные разветвления; 5 – свободная сегментная излучина ($l/L = 1,4$); 6 – разветвления в устьях рек; 7 – показатель степени устойчивости русла (число Лохтина) на ключевых участках; 8 – гидрологические посты (а – Фоминское; б – Усть-Чарышская Пристань); 9 – пойма; 10 – бровки склонов: а – коренных бортов долины, б – надпойменных террас.

Анализ связи морфодинамических типов русла и его суммарной (вместе с островами) ширины b_p показывает, что наибольшая ширина (более 2,5 км) характерна для параллельно-рукавных и односторонних разветвлений, а также для узлов слияния рек (Бии и Катунь, Оби с Чарышом). Минимальна ширина на тех участках, где присутствует один наиболее водный рукав, где происходит концентрация стока в одном из рукавов: суммарная ширина сокращается до 1,5 км (рис. 3.4). Более наглядно распространение типов русла на участке можно отобразить с помощью диаграммы (рис. 3.5).

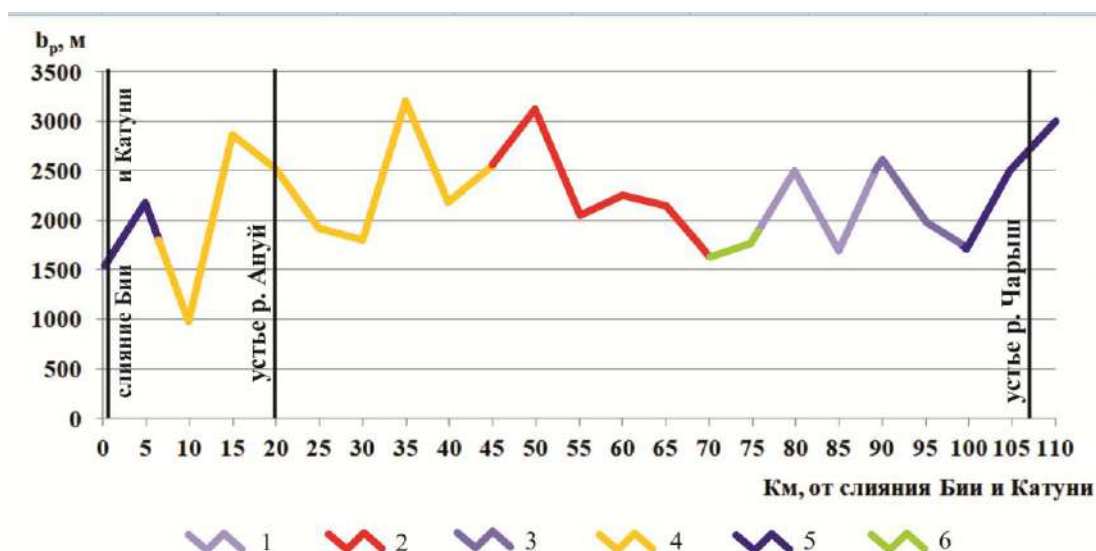


Рисунок 3.4 — Изменение суммарной ширины и морфодинамических типов верхней Оби на участке от слияния Бии и Катунь: 1 — односторонние; 2 — чередующиеся односторонние; 3 — сложные одиночные; 4 — параллельно-рукавные; 5 — устьевые (дельтовые); 6 — свободная сегментная излучина.

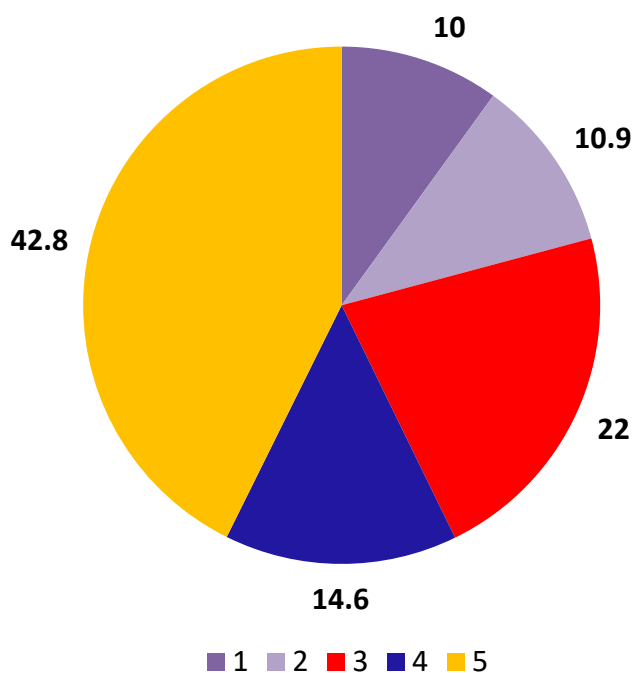


Рисунок 3.5 — Основные морфодинамические типы разветвлений на верхней Оби: 1 — сложные одиночные; 2 — односторонние; 3 — чередующиеся односторонние; 4 — устьевые (дельтовые); 5 — параллельно-рукавные.

Разветвление в узле слияния Бии и Катунь.

Определяющим тип разветвления, морфометрические характеристики и расположение островов является взаимодействие потоков двух сливающихся рек, влияние которых на формирование русла распространяется далеко за пределы узла слияния ниже по течению Оби. Приустьевые участки двух сливающихся рек и первые километры

объединенного русла Оби образуют дельтовые разветвление. Главная их особенность заключается в неоднозначности гидрологических характеристик сливающихся рек, одновременности прохождения по ним многоводных фаз водного режима и различия в стоке наносов, обуславливающих тип дельт, формирующихся каждой рекой (рис. 3.6). Среднегодовой расход Катунь (на приустьевом участке) примерно на 30 % больше среднегодового стока Бии ($657\text{ м}^3/\text{с}$ и $477\text{ м}^3/\text{с}$ соответственно). Кроме того, Катунь выносит количество наносов, в 1,65 раза превосходящее твердый сток Бии, который зарегулирован Телецким озером [Сурков, Чалов, 2002]. Потоки сливающихся рек не смешиваются (что проявляется в визуальном различии мутности водных масс вдоль левого и правого берега объединенного русла и в формировании двух динамических осей потока). Граница между ними проходит в центральной части русла, и вдоль нее происходит аккумуляция наносов, приведшая к формированию параллельно-рукавного русла. Это, однако, стало возможным благодаря неустойчивости и большой ширине русла ниже узла слияния. Катунь, более многоводная река, на которой половодье проходит раньше, чем на Бие, формирует дельту выдвижения, представленную тремя основными рукавами, наиболее водным из которых является центральный рукав (до 50 % стока), в том числе из-за выправительных мероприятий [Беркович, Зайцев, 1976; Никитина, Чалов, 1988]. Русло Катунь на приустьевом участке, хотя и обладает большей устойчивостью, чем верхней Оби, намного меньше, чем на приустьевом участке Бии ($K_c=10,5-12$). Большое количество наносов, выносимых Катунью, обуславливает постоянное удлинение Бийско-Катунской пойменной стрелки и ее трансгрессивное смещение вниз. Об этом свидетельствуют как поперечные ложбины в рельефе поймы, так и протока Старая Катунь, фиксирующая наиболее древнее из сохранившихся положений узла слияния. [Русловые процессы..., 1996].

Бия формирует относительно небольшую внутреннюю дельту выполнения [Никитина, 1989], характеризующуюся раструбообразным расширением русла выше стрелки (ширина увеличивается приблизительно в 1,5 раза) и формированием в нем группы островов различных размеров, от небольших ($L_o = 250-270$ м), до более крупных ($L_o = 650-700$ м) островов. Наиболее крупными являются острова группы Березовских, формирование которых началось еще в начале XX века, и в настоящее время они достигают 700–800 м в длину и 210–250 м в ширину. Устойчивость русла наибольшая на рассматриваемом участке (включая объединенное русло Оби) $K_c = 13-14$, а на отдельных участках возрастает до 15, что обуславливает относительно стабильное положение островов и отсутствие существенных переформирований самой дельты и изменений водности основных рукавов в многолетнем и сезонном плане.

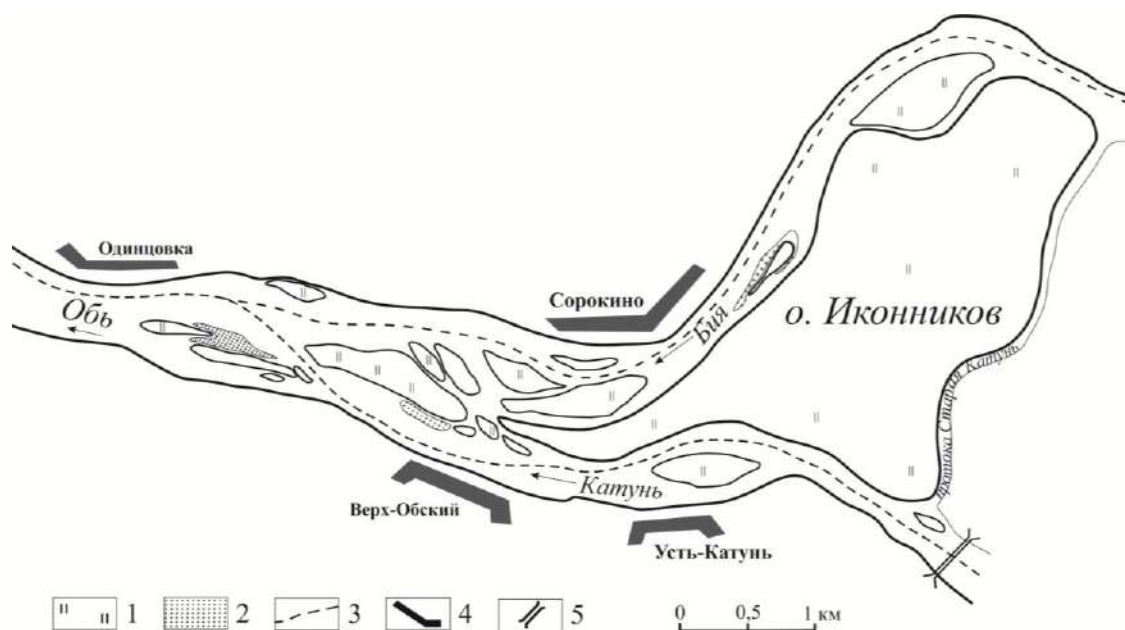


Рисунок 3.6 — Схема разветвления в узле слияния Бии и Катуни: 1 — пойма; 2 — прирусловые отмели; 3 — положение стрежня потока; 4 — населенные пункты; 5 — мостовой переход через р. Катунь.

После завершения формирования дельты выдвижения Катуни, приблизительно с 1920-х годов начался интенсивный процесс формирования параллельно-рукавного русла вниз по течению, распространяясь на нижерасположенные участки русла и к настоящему времени охватывая практически весь 100-километровый участок от слияния до устья р. Чарыша, где ранее были распространены преимущественно односторонние и чередующиеся односторонние разветвления. Это может быть связано, прежде всего, с поступлением большого количества наносов, которые, минуя дельтовое разветвление в узле слияния, поступают в русло Оби, способствуя его переформированию, вследствие чего стала происходить смена морфодинамического типа русла на Оби.

Одинцовско-Фоминский узел

Первые 7–9 км объединенного русла (между дельтовым и расположенным ниже Фоминским узлами) занимает короткое одностороннее Одинцовское разветвление, образованное двумя крупными островами ниже дельты выдвижения Катуни, и ставшее в результате выправительных работ одиночным Фоминское, до антропогенного вмешательства (до второй половины XX в.) бывшее верхним звеном параллельно-рукавных разветвлений. От слияния Бии и Катуни до устья р. Песчаной (16 км судового хода) русло разделено на два субпараллельных рукава, приблизительно равных по водности (правый забирает до 60 %, а левый — до 40 % стока). Рукава разделены группой островов в центральной части русла, составляющих из-за маловодности межостровных протоков (доли или первые проценты расхода воды), по существу, единую группу. Острова

обоих разветвлений достигают 2 км в длину и 400 м в ширину. Более мелкие острова, сформировавшиеся вдоль больших, вместе с ними объединены в архипелаги, разделенные пересыхающими в межень протоками шириной до первых десятков метров, их линейные размеры — от 150 до 800 м в длину и от 35 до 250 м в ширину. Правые рукава Одинцовского и Фоминского разветвлений носят плесовый характер (в Фоминском разветвлении — вследствие в том числе разработки капитальной дноуглубительной прорези), в то время как в левые поступает большое количество наносов из Катунь, приводящих к формированию в нем крупных прирусловых отмелей и осередков.

В целом данный участок русла характеризуется резким уменьшением устойчивости (по сравнению с приустьевыми участками Бии и Катунь), и по значениям числа Лохтина его следует относить к неустойчивому. Снижение степени устойчивости происходит, во-первых, из-за изменения уклонов при выходе из предгорных районов на равнину, а также из-за уменьшения крупности руслообразующих наносов, которые здесь в основном представлены песками (преимущественно средне- и мелкозернистыми). В среднем значения уклонов изменяются от 0,45 ‰ на приустьевом участке Катунь до 0,16–0,18 ‰ на данном участке [Русловые процессы на реках ..., 1996]. Кроме того, здесь происходит резкое расширение днища долины Оби, исчезает ограничивающее воздействия коренных берегов, наблюдавшихся на приустьевых участках Бии и Катунь. Значительную дестабилизирующую роль оказывает ширина русла, которая в 1,5–2 раза превышает ширину русел Бии и Катунь и составляет 1,1–1,6 км. Однако, несмотря на относительно малую устойчивость русла, основные острова, определяющие морфологический облик разветвлений, имеют достаточно большие линейные размеры ($L_0 > 700$), а также слабо подвержены переформированиям, что нетипично для параллельно-рукавного русла. Это объясняется, прежде всего, тем, что развитие данного узла началось раньше остальных, расположенных ниже по течению, что привело к формированию в потоке соответствующей гидравлической структуры, обеспечивающей динамическую устойчивость форм русла и островов, а также систематическими дноуглубительными работами, проводившимися здесь во второй половине XX века (в 1960–80-е гг.). Эти факторы обусловили стабилизацию узлов разветвления, укрупнение островов и увеличение относительной водности, прежде всего, правого рукава, проходящего вдоль уступа надпойменной террасы. Морфометрические параметры рукавов также различаются: ширина правого достигает 500–600 м, а левого — 400–450 м. Степень разветвленности русла здесь относительно невелика, что также объясняется стабилизацией правого рукава и его систематическим дноуглублением [Чалов, 1990]

Усть-Ануйский — Дмитриевский узел

Усть-Ануйский — Дмитриевский узел охватывает участок реки от 15 до 30 км судового хода. Он включает в себя многочисленную группу Ануйских небольших островов, расположенных напротив устья левого притока — р. Ануй, а также находящийся ниже Дмитриевский узел, характеризующийся островами более крупных размеров. Параллельно-рукавное русло здесь является естественным продолжением Фоминского участка, до проведения в последнем выправительных работ и его обособления по отношению к единому по морфологии участку русла. Однако его морфология существенно усложняется, увеличивается количество островов и разнообразие их размеров. Это связано, прежде всего, с понижением устойчивости (русло здесь неустойчивое) и перемещением сюда зоны аккумуляции наносов, проходящих транзитом более устойчивый Фоминский узел, а также впадением р. Ануй, возле устья которого находится группа прибрежных островов. Участок характеризуется чрезвычайно сложной конфигурацией, обилием осередков и элементарных и других островов разных размеров, разделяемых сложной сетью протоков и рукавов. При этом большинство островов имеет небольшие размеры. Средняя длина островов на участке — порядка 200–300 м, ширина — 70–90 м, в то время как отдельные, молодые элементарные острова не превышают 100–120 м в длину. Несмотря на развитое здесь параллельно-рукавное разветвление и двухстречневой характер потока, количество протоков, разделяющих острова, может достигать 7–9. Для участка характерна наибольшая степень разветвленности русла: количество островов на 1 км длины русла в среднем составляет от 4 до 5, при максимальных значениях 6,5–7. Столь сильно разветвленному руслу соответствует малая степень устойчивости. Значения числа Лохтина L и коэффициента Н.И. Маккавеева K_c являются самыми низкими на всем субширотном участке верхней Оби, составляя, 2,2–2,4 и 2,8–3,0 соответственно [Русловые процессы, 1996]. Слабая устойчивость коррелирует со значительной шириной русла, которая с учетом всех островов и протоков достигает 2,2–12,7 км.

Более широким является левый рукав, который сохранял свои размеры и глубину на протяжении всего периода формирования узла. По мере того как правый рукав постепенно мелел и отмирал, основной поток был оттеснен к левому берегу, при этом часть островов оказалась в периферической правосторонней части русла [Беркович, Гаррисон и др., 1990]. В итоге произошло смещение стречней потока к левому берегу и сужение пространства между основными рукавами, а вдоль правого берега сформировались большие островные массивы вытянутой формы, отделенные от правого берега маловодной протокой, водность которой последовательно сокращается ($\approx 28\%$ в 1962 г., 12% в 2016 г.). Острова, попавшие в зону аккумуляции наносов и замедленных

скоростей течения вдоль правого берега, стали интенсивно увеличиваться в размерах, а межостровные протоки — сужаться и отмирать [Рулева, Парамзин, 1995]. К настоящему времени многие из этих островов трансформировались в крупные островные массивы, зачастую сложной формы, состоящие из множества объединившихся более мелких островов (до 15–20). Размеры таких крупных островов достигают 3–5 км в длину и 800–1500 м в ширину. Одновременно с этим в сместившейся к левому берегу динамической оси потока формируются новые острова, определяющие облик параллельно-рукавного русла, обладающие небольшими размерами и объединенные, как правило, в архипелаги, между которыми наблюдается зона замедления течения и аккумуляции наносов. Иными словами, произошло сужение активной части русла и смещение параллельно-рукавной системы к левому берегу с развитием уже внутри нее новых элементарных островов (рис. 3.7). В месте впадения р. Ануй стрежень потока в левом рукаве несколько отклоняется от берега к центральной части русла, а в прибрежной части в зоне аккумуляции наносов располагаются небольшие, вытянутые в плане ($L_0/B_0 = 4-4,5$) острова [Чалов, Жмыхова, 2014].

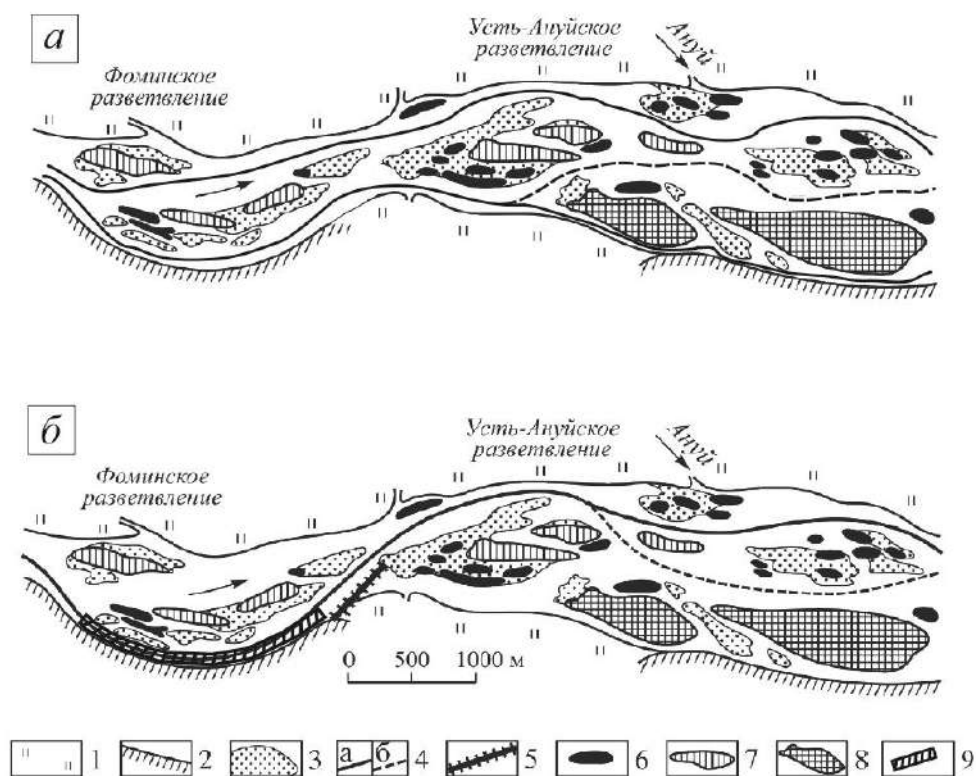


Рисунок 3.7 — Фоминский и Усть-Ануйский узел параллельно-рукавного разветвления верхней Оби: а — начало XX века; б — современное. 1 — пойма; 2 — коренные берега; 3 — прирусловые отмели; 4 — положения стрежневых зон потока (а — современное; б — прошлое); 5 — дамбы; 6 — элементарные острова; 7 — большие

острова; 8 — островные массивы; 9 — капитальная дноуглубительная прорезь. [Голубцов, Чалов, 2019, с дополнениями].

Акутихинский узел

Данный узел охватывает участок реки от 30 до 45 км судового хода и включает в себя Талицкое, Картуковское и Акутихинское разветвления. Данному узлу присуща сложная морфология разветвленного русла и интенсивные переформирования островов, образующих разветвления [Беркович, Рулева и др., 1989]. По сравнению с Усть-Ануйским разветвлением степень разветвленности русла уменьшается в 1,5–1,6 раза, устойчивость несколько повышается ($L = 3,5-3,7$; $K_c = 4,7-4,9$), хотя она остается достаточно низкой, поэтому развитие параллельно-рукавных разветвлений на данном участке протекало аналогично вышерасположенным участкам. Наблюдалось постепенное обмеление правого рукава, при этом часть островов, формируясь в периферической зоне русла с пониженной транспортирующей способностью, обрастала побочными и косами, и в конечном счете некоторые из них причленились к берегу. Размеры таких островов существенно больше развитых в центральной части русла элементарных островов. Их длина достигает 1,8–2 км, ширина — 500–600 м. Количество рукавов и протоков здесь меньше, но все равно в одном створе может насчитываться до 6–7 островов и столько же протоков, разделяющих их. Длина большинства островов в центральной части русла не превышает 400–500 м, ширина — 100–150 м. Протоки между островами маловодны (до 10–12 %), средние глубины в межень не превышают 0,5–0,7 м. Таким образом, поступление транзитных наносов с вышележащих участков и дестабилизирующая ширина русла (здесь она наибольшая на верхней Оби, достигает 2,6–2,8 км) способствует образованию многочисленных элементарных островов. Характерной особенностью Акутихинского узла разветвления является отсутствие центрального крупного острова или островного массива, который способствовал бы стабилизации как стрежней потока, так и самого узла [Беркович, Злотина, 1983]. Форма большинства островов вытянута, как правило ($L_0/B_0 = 4,5-4,9$). Периодически в центральной части русла стрежни потока подходят максимально близко друг к другу, но их объединения в единую зону не происходит. Данный узел разветвления, как и вышерасположенные, является параллельно-рукавным, формирующимся путем развития и увеличения водности и превращения второстепенных протоков в бывших прибрежных (чередующихся односторонних) разветвлениях в равные по водности основные рукава.

Быстроистокский узел

Узел охватывает участок реки от 45 до 70 км судового хода. Его особенностью является то, что здесь уже ослабевает влияние двух потоков сливающихся рек — бийского

и катунского, но тенденция развития параллельно-рукавного русла сохраняется. Возрастает доля крупных островов в периферических частях русла, общая степень разветвленности и количество островов меньше. Это обусловлено увеличением устойчивости: число Лохтина в начале узла составляет 4,2, затем повышается до 4,5–4,7; аналогично растет и коэффициент стабильности Н.И. Маккавеева, увеличивающийся до 6,2–6,5 (в Акутихинском разветвлении — 4,9). Несмотря на это, количество островов на 1 км длины составляет 2,5–3, но при этом основная доля стока концентрируется в одном из рукавов, достигая 60–70 %, в то время как другие рукава являются относительно маловодными [Жайворон, Чалов, 1990]. В местах, где происходит концентрация потока, увеличивается общая ширина рукава. Так, непосредственно у п. Быстрого Истока ширина основного рукава превышает 1 км при суммарной ширине русла с расположенными правобережными островами 2750 м. Поэтому изменения типа русла не происходит — оно остается параллельно-рукавным, но ветви течения разделяются осередками и небольшими элементарными островами. Острова в периферических частях русла отличаются существенно большими размерами, чем образующие параллельно-рукавное разветвление: длина многих из них превышает 1 км, ширина — 400 м. Соотношение длины островов к их ширине (коэффициент формы) также изменяется, острова становятся более изометричными, и часто $L_o/B_o < 3,5$.

Характерной особенностью данного узла является недавнее формирование параллельно-рукавных разветвлений, которое продолжается и в настоящее время. Если в конце 1970-х гг. здесь преобладали чередующиеся односторонние разветвления, то теперь развиты параллельно-рукавные, образовавшиеся благодаря увеличению водности и развитию рукавов среди прибрежных островов. Размеры таких островов, оказавшихся между двумя приблизительно равными по водности рукавами, больше, чем в вышерасположенном Акутихинском разветвлении, где преобладают элементарные и малые острова, и достигают $L_o = 1-1,5$ км; $B_o = 250-400$ м.

Солдатовский-Карповский участок

Данный узел образует почти всю нижнюю треть субширотного участка верхней Оби, начиная с 70 км судового хода почти до слияния с Чарышом. Характерной особенностью является то, что практически весь поток концентрируется в одном рукаве, водность которого составляет около 75–80 % [Беркович, Гаррисон, и др., 1990]. Остальные же представляют собой извилистые и длинные маловодные протоки, в меженный период забирающие не более 5–7 % стока, а иногда пересыхающие полностью. Ширина основного рукава невелика (в среднем от 550 до 850 м), что способствует концентрации потока и соответствует увеличению устойчивости русла [Чалов. Завадский, 2008].

Показатели устойчивости здесь выше, чем на Быстроистокском участке (число Лохтина увеличивается с 4,7 до 4,9, коэффициент стабильности Н.И. Маккавеева достигает 7). Одновременно с ростом устойчивости изменяется как степень разветвленности русла, так и размеры островов, образующих разветвления. Количество островов на 1 км длины русла сокращается до 1–1,2, на отдельных участках — до 0,5–0,7. При этом все острова, образующие здесь преимущественно односторонние разветвления, расположены в периферической части русла и имеют значительные размеры, но в основном (70–75 % водности) рукаве встречаются либо одиночные разветвления 2-го и 3-го порядков, либо в нем в межень формируются отмели и осередковые разветвления. Средняя длина островов в односторонних разветвлениях на участке превышает 2–2,5 км, в то время как максимальная достигает 3,1–3,5 км, ширина — 1,1–1,6 км. Форма в плане становится более изометричной, для большинства островов L_o/B_o не превышает 1,5–2. Острова Карповский и Шишов имеют длину свыше 3,3 км, ширину — около 1,5 км и являются наиболее крупными на участке (рис. 3.8). Значительные размеры самих островов обуславливают ширину пояса разветвления, равную 3,5 км. Ширина правого (основного) рукава здесь составляет 700–800 м, левого — 300–350 м, причем последний изобилует отмелями и осередками, а его истоки периодически перекрываются массивными побочными. Еще более маловодным (до 10 % стока в меженный период) является рукав слева от о. Шишов. Большая устойчивость и концентрация потока в одном рукаве способствуют стабильному состоянию многих островов и островных массивов, переформирования их незначительны и в основном связаны с формированием и смещением прирусловых отмелей и кос в ухвостьях островов.



Рисунок 3.8 — Карповское и Шишевское разветвления на верхней Оби.

Узел слияния Оби и Чарыша (Усть-Чарышский)

Данный узел расположен на 99–101 км судового хода. Долина Оби делает здесь коленообразный изгиб и меняет направление с субширотного на субмеридиональное

[Беркович, Рулева и др., 1989]. Изменяются и морфологические особенности днища долины, происходит смена левобережной поймы правобережной, а левый берег ниже устья р. Чарыша представляет собой уступ Приобского плато, достигающего отметок 90–100 м над урезом воды [Энциклопедия., 1995]. Деформации в узле слияния с Чарышом определяются несовпадением времени половодий, так как гидрологический режим Чарыша отличается от гидрологического режима основной реки. По отношению к Оби Чарыш обладает небольшой водностью — $192 \text{ м}^3/\text{с}$, которая не достигает и 20 % от стока верхней Оби на данном участке [Беркович, Жуков, и др., 1983]. Вследствие этого он почти всегда находится в подпоре, за исключением периода половодья, во время которого доля стока Чарыша возрастает до 65 % от Обского, поскольку половодье на притоке опережает половодье на Оби. В этот период Чарыш оказывает подпорное воздействие, особенно сильно влияющее на левый рукав Оби в месте слияния, доля стока в котором сокращается и поток оттесняется к правому берегу и концентрируется в правом рукаве. В периоды, когда Обь находится в подпоре, наносы, выносимые Чарышом, интенсивно аккумулируются непосредственно ниже узла слияния и способствуют возникновению здесь отмелей, осередков, а затем и островов, при этом уже существующие острова объединяются и укрупняются [Жайворон, Чалов, 1990]. Наоборот, когда Обь оказывает подпорное влияние на приустьевой участок Чарыша, возрастает доля стока в левом рукаве, протягивающемся непосредственно от русла Чарыша до п. Усть-Чарышская Пристань (рис. 3.9).

Характеристики русла и связанные с ними морфометрические характеристики островов на этом сложном участке устьевого разветвления определяются в первую очередь несовпадением во времени половодий и поворотом Оби под углом в 90° при подходе реки к уступу левого берега — Степному плато, относительной высотой 100 м. Во-первых, отмечается локальное снижение устойчивости русла, связанное с поступлением наносов (особенно в период, когда Обь находится в подпоре), увеличением ширины русла и, как следствие, всего узла разветвления. Ширина русла Чарыша в приустьевой части составляет порядка 370–400 м, а с учетом русла Оби суммарная ширина дельтового разветвления составляет 2,4–2,6 км. Число Лохтина на участке составляет 2,8–3,0, коэффициент Н.И. Маккавеева — 3,7–4,0. Острова на данном участке в основном имеют значительные размеры ($L_o > 1000\text{--}1200 \text{ м}$, $B_o > 300\text{--}400 \text{ м}$). Степень разветвленности русла относительно невелика из-за больших размеров островов, преобладают изометричные, консолидированные островные массивы $L_o/B_o = 2\text{--}2,5$ и отдельные большие острова с $L_o/B_o = 2,5\text{--}3$. Острова меньших размеров ($L_o \leq 600 \text{ м}$, $B_o \leq$

200 м) расположены в русле Оби, средние, большие и островные массивы образуют Обско-Чарышскую стрелку и распространены ниже слияния.

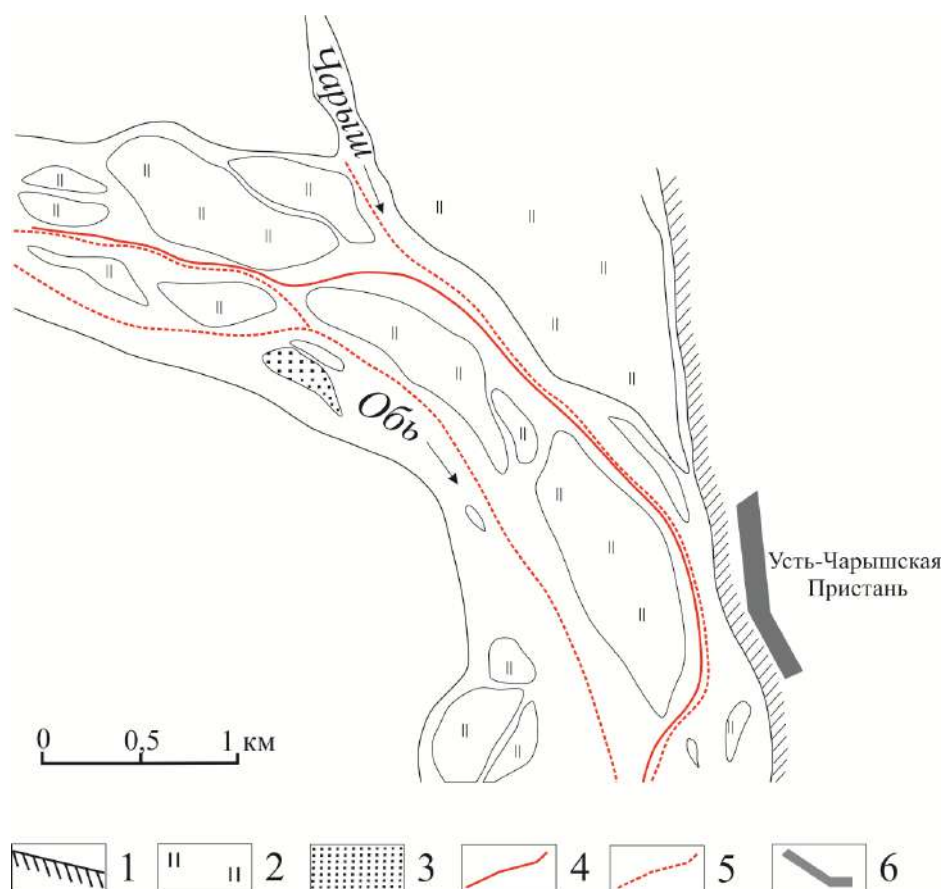


Рисунок 3.9 — Схема Усть-Чарышского (дельтового) разветвления верхней Оби: 1 — коренные борта долины; 2 — пойма; 3 — прирусловые отмели, осередки; 4 — положение динамических осей потока в случае подпора Чарыша Обью; 5 — положение динамических осей потока в случае подпора Оби Чарышом.

3.3. Разветвленное русло средней и нижней Лены (характеристика разветвлений, динамика островов и их морфометрические параметры).

Морфодинамические типы русла. Почти 700-километровый участок Лены (от г. Покровска до о. Сахам) представлен разнообразными типами русла, включающими в подавляющем большинстве русловые разветвления, доля которых с учетом разветвленно-извилистого русла составляет 94,5 %. Оставшиеся 5,5 % приходятся на относительно прямолинейное неразветвленное русло, которое короткими вставками располагается в местах сужения днища долины (рис. 3.10, табл. 3.4). Расположенные ниже о. Сахам разветвления отличаются менее интенсивными русловыми переформированиями и обуславливают большую морфологическую однородность русла, связанную с повышением степени устойчивости. Кроме того, практически все разветвления являются островными (русловыми), небольшая доля приходится на пойменно-русловые

разветвления, полностью отсутствуют раздвоенные русла, в отличие от соизмеримой по размерам средней и особенно нижней Оби [Чалов, Камышев, и др., 2022].

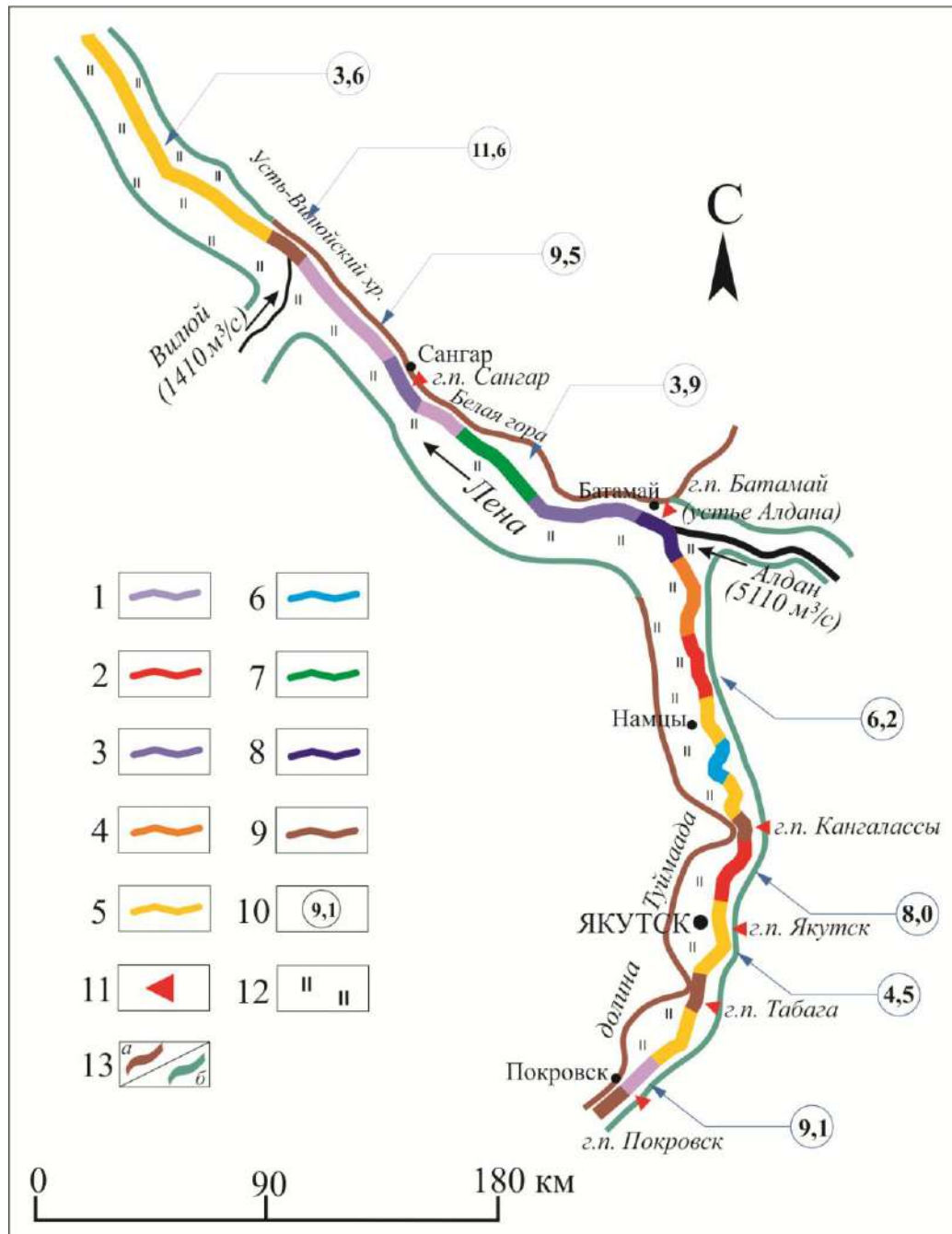


Рисунок 3.10 — Схема распространения морфодинамических типов русла и геоморфологических условий их формирования на средней и нижней Лене: 1 – одиночные в т.ч. сложные одиночные разветвления; 2 – чередующиеся односторонние разветвления; 3 – односторонние разветвления; 4 – сопряженные разветвления; 5 – параллельно-рукавные разветвления; 6 – разветвлено-извилистое русло; 7 – пойменно-русовые разветвления; 8 – разветвления в устьях рек (дельтовые); 9 – относительно прямолинейное, неразветвленное русло; 10 – показатель степени устойчивости русла (число Лохтина) на ключевых участках; 11 – гидрологические посты; 12 – пойма; 13 – бровки склонов а: коренных бортов долины, б: надпойменных террас.

Таблица 3.4 — Основные морфодинамические типы русла на участке средней и нижней Лены от г. Покровска до разветвления Сахам (1725–1095 км с/х).

Участок (км с/х)	Тип русла	Протяженность, км/доля, % от длины участка
1730-1720	Относительно прямолинейное, неразветвленное	10/1,6
1720-1705	Сложное одиночное разветвление (Покровское)	15/2,4
1705-1680	Параллельно-рукавное («разбой» Рассолода)	25/3,9
1680-1660	Относительно прямолинейное неразветвленное	20/3,1
1660-1630	Параллельно-рукавное (Якутский «разбой»)	30/4,7
1630-1598	Чередующиеся односторонние разветвления	32/5,0
1590-1555	Разветвленно-извилистое	35/5,5
1555-1530	Параллельно-рукавное (Намский участок)	25/3,9
1530-1485	Сопряженное (Ат-Арынско- Хайтыалаахское)	45/7,1
1485-1455	Сопряженное (Приалданское)	30/4,7
1455-1447	Устьевое (устье Алдана)	8/1,3
1447-1370	Одностороннее	77/12,1
1370-1341	Пойменно-русловое (Белогорское)	29/4,6
1341-1240	Односторонние (Сангар) и одиночные (Сангарское Лебединое, Орулганское)	101/15,9
1240-1230	Относительно прямолинейное неразветвленное	10/1,6

1230-1190	Параллельно-рукавное (Монастырское)	40/6,3
1190-1145	Параллельно-рукавное (Черпальское)	45/7,0
1145-1120	Одностороннее (Ыт-Халбыт)	25/3,9
1120-1095	Параллельно-рукавное (Сахам)	25/3,9
Всего		635/100

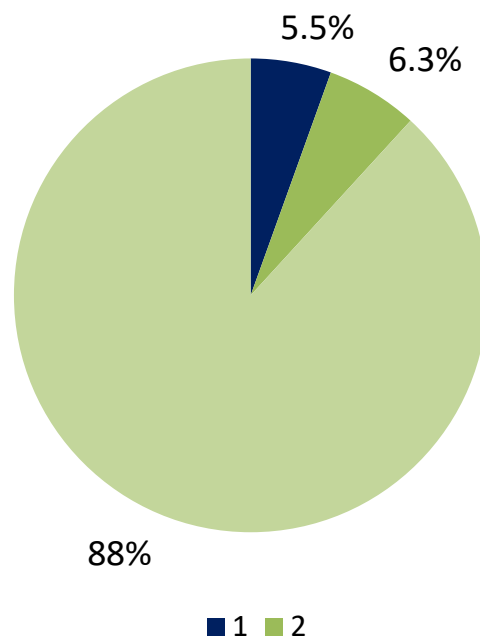


Рисунок 3.11 — Распространение морфодинамических типов русла на средней и нижней Лене: 1 — относительно прямолинейное неразветвленное; 2 — разветвленное, в т.ч. разветвлено-извилистое.

Без учета относительно прямолинейного неразветвленного русла распределение морфодинамических типов разветвлений представлено на рис. 3.12. Наибольшую долю (в сумме около 60 %) занимают параллельно-рукавные и односторонние разветвления. Последние образуют протяженный участок непосредственно ниже устья Алдана, за исключением Белогорского узла. Около 15 % приходится на одиночные и сложные одиночные разветвления, которые распространены ниже п. Сангар вплоть до устья Вилюя. Еще 13 % занимают сопряженные разветвления, оставшиеся 12 % приходится на пойменно-русловые, чередующиеся односторонние и устьевые (дельтовые) разветвления, которые занимают 6, 5 и 1 % длины русла соответственно.

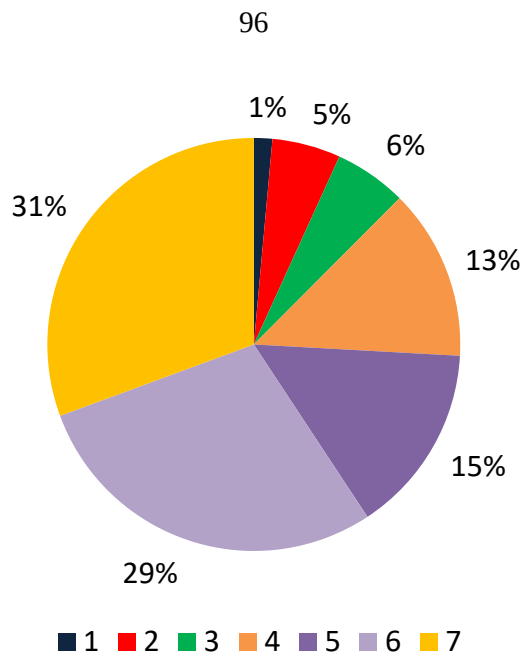


Рисунок 3.12 — Основные морфодинамические типы разветвлений (без учета прямолинейного русла) на средней и нижней Лене: 1 — устьевое (при слиянии с Алданом); 2 — чередующиеся односторонние; 3 — пойменно-русловое; 4 — сопряженные; 5 — одиночные (в т.ч. сложные одиночные); 6 — односторонние; 7 — параллельно-рукавные.

В отличие от верхней Оби, где изменения суммарной ширины русла связаны ниже слияния Бии и Катунь вниз по течению с изменениями типа русла, распределение b_p на Лене обусловлено, в первую очередь, водностью реки и геолого-геоморфологическими условиями (рис. 3.13). Она возрастает ниже устья Алдана: выше по течению везде $b_p \ll 10$ км, в узле слияния $b_p = 11\text{--}13$ км, а ниже за исключением небольших участков сужения b_p всегда >10 км, достигая значений 15–20 км, максимально — 28,5 км ниже устья Вилюя (Черпальское разветвление). Самые большие значения ширины отмечаются в параллельно-рукавных и односторонних разветвлениях (в последнем случае за счет больших размеров островов, их образующих). Значительная суммарная ширина русла достигается на участке чередующихся односторонних разветвлений ниже Якутска и особенно ниже п. Кангалассы, где поток обтекает группу правобережных островов, образуя пологую излучину с вогнутым левым берегом (что может быть основанием выделения здесь небольшого участка разветвлено-извилистого русла) и в пойменно-русловом Белогорском разветвлении (за счет крупных пойменных островов). Минимальная ширина русла — на участках неразветвленного русла (2,5–3,5 км) в створах сужений дна долины у Табагинского утеса и Кангаласского камня на средней Лене и у устья Вилюя на нижней Лене.

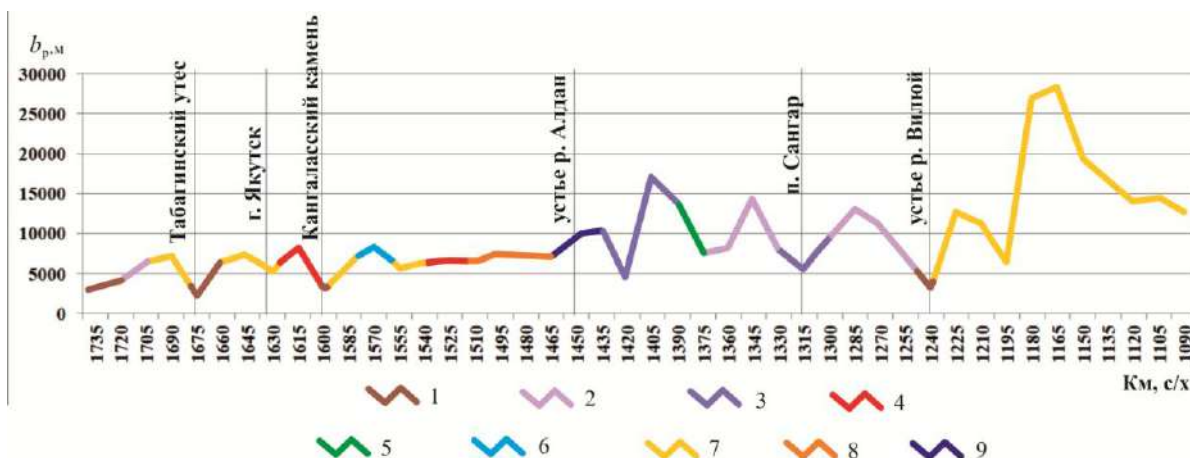


Рисунок 3.13 — Изменение морфодинамических типов русла и его суммарной ширины по длине участка средней и нижней Лены. 1 — относительно прямолинейное, неразветвленное русло; 2 — одиночные, в т.ч. сложные одиночные разветвления; 3 — односторонние разветвления; 4 — чередующиеся односторонние разветвления; 5 — пойменно-русовые разветвления; 6 — разветвлено-извилистое русло; 7 — параллельно-рукавное русло; 8 — сопряженные разветвления; 9 — разветвления в узлах слияния рек (дельтовые).

Разветвленное русло средней и нижней Лены формируется в условиях свободного развития русловых деформаций, являясь широкопойменным на всем протяженном участке (от г. Покровск до с. Жиганск). Изредка русло подмывает уступы высоких террас (Нижний Бестях, Песчаная гора) и подходит к мысам, сложенным коренными породами (Табагинский утес, Кангаласский камень). В первом случае, когда уступы сложены легкоразмываемыми отложениями, они служат мощным местным источником поступления наносов в русло (несмотря на их сцементированность мерзлотой), что приводит к формированию ниже по течению сложных перекатов и разветвлений. Руслообразующие наносы на средней и нижней Лене преимущественно песчаные, гравий и галька встречаются только ниже стеснения русла выступами коренных пород, а также ниже впадения притоков стекающих со склонов Верхоянского хребта ниже устья р. Алдан. Однако галечные наносы, выносимые Алданом, не оказывают существенного влияния на русловые деформации Лены, ограничиваясь узкой полосой в правой части русла непосредственно ниже узла слияния, но они обеспечивают повышение крупности аллювия в правых рукавах вплоть до Белогорского разветвления, способствуя увеличению устойчивости русла. Наносы Вилюя в большей степени оказывают влияние на развитие и переформирование разветвлений ниже его впадения, активно поступая и аккумулируясь в

левобережных рукавах и протоках ниже по течению. Однако они влияют на изменение баланса наносов, практически не изменяя их механический состав [Борсук, Лодина, 1974].

На крупных прирусловых отмелях в активной части русла и тем более во второстепенных протоках крупность наносов снижается, наиболее мелкие распространены в ухвостьях островов и осередков, в затонских частях перекатов, в маловодных межостровных протоках. Вместе со значительной шириной русла (которая в зависимости от участка изменяется от 3 до 12 км), возрастающей по мере увеличения водности до максимальных значений 28 км ниже устья Вилюя, это приводит к снижению степени устойчивости русла. В соответствии с классификацией русел рек по степени устойчивости Лена на всем протяжении исследуемого участка относится к рекам с неустойчивым и слабоустойчивым руслом [Чалов, 2008]: средние значения числа Лохтина L и коэффициента стабильности Н.И. Маккавеева K_c , от 2,5 до 6,5 и от 4,5 до 7,7 соответственно, причем их минимальные и максимальные значения имеют значительный разброс. Для сравнения: на верхней Лене, где распространено врезанное русло, аналогичные показатели имеют значения, достигающие нескольких десятков ($L=50-60$). Неустойчивость русла усугубляется спецификой формирования стока наносов в целом, заключающейся в значительных сезонных колебаниях мутности (в зависимости от фазы гидрологического режима). Ее увеличение наблюдается в летнюю межень и осенние паводки, когда деятельный слой в условиях вечной мерзлоты имеет максимальную мощность и начинается активное поступление материала со склонов долины в русло. Напротив, прохождение половодья происходит в период, когда мощность оттаявшего слоя минимальна и насыщение потока взвешенными наносами минимально. Фактором, оказывающим влияние на русловые переформирования, является также высокая доля стока влекомых наносов (до 37 % от общего стока [Алексеевский, 1998; Чалов и др, 2000]).

Покровское сложное одиночное разветвление начинается непосредственно ниже г. Покровска, имеет протяженность порядка 20 км, сменяя почти 90-километровый отрезок относительно прямолинейного адаптированного неразветвленного русла, протягивающегося от п. Мохсоголлох до г. Покровска вдоль левого высокого коренного берега, сложенного трудноразмываемыми отложениями. Несмотря на относительно высокую устойчивость ($L>7$), русло характеризуется сложным режимом и морфологией, его переформирования определены здесь косами от ухвостьев островов, образующих параллельно-рукавные разветвления врезанного русла выше по течению. Правый берег пойменный, вдоль него протягиваются прибрежные острова, водность протоков за которыми незначительна (суммарно до 5 %), в то время как водность основного рукава составляет 95–97 %. Начиная с 1725 км происходит резкое расширение днища долины, по

левобережью развита пойма шириной до 7 км, а русло разделяется на рукава тремя островами, находящимися в его центральной части, образуя сложное одиночное Покровское разветвление. В конце XIX — начале XX века оно было верхним звеном в цепочке сопряженных разветвлений, которые в то время занимали все русло до Кангаласского камня [Чалов, 2018]. В настоящее время Покровское разветвление при ширине русла 5,5–6,5 км характеризуется четырьмя субпараллельными рукавами, разделенными крупными островами, крайний правый из которых — наиболее длинный, проходящий вдоль правого берега и отделенный от остальных достаточно крупным островным массивом (длина которого превышает 8 км). Вдоль правого берега проходит также маловодная (относительная водность — 3 %) пойменная протока, которая в меженный период практически полностью пересыхает. Однако в начале XX века именно эта протока являлась одним из двух основных рукавов данного звена сопряженных разветвлений. [Чалов, Завадский и др..., 2016]. Устойчивость русла на данном участке невелика, средние значения L и K_c равны 4,5 и 5,8 соответственно. Средние значения длины островов составляют 1800–2200 м, ширины — 500–700 м (максимальные значения $L_o = 4800$, $B_o = 1650$). Наиболее широким является крайний левый рукав (1200 м), расположенный справа от о. Шкалик. Судоходный рукав имеет ширину около 600 м, причем в его правой части формируются отмели и косы, протягивающиеся от оголовка о. Сюге-Ойос. Ширина остальных рукавов колеблется от 500 до 1100 м. Переформирования Покровского разветвления заключаются в периодическом развитии левого и правого рукавов с преимущественным по продолжительности левого, что связано со смещением и отторжением лево- и правобережных кос и побочней с вышележащего участка прямолинейного русла.

«Разбой» Рассолода («разбой» — на Лене местное название сложноразветвленного русла), начинающийся непосредственно ниже Покровского, характеризуется увеличением суммарной ширины русла до 7 км; разветвления приобретают здесь более сложный характер с образованием в основном русле двух стрежневых зон потока, проходящих вдоль правого пойменного берега и вдоль левобережной группы островов, образующих пойменную многорукавность, связанную с систематическим заторами у замыкающего участка Табагинского утеса. «Разбой» Рассолода является первым крупным участком параллельно-рукавного русла на средней Лене, протяженностью 27 км, начинаясь группой островов в центральной части русла (о. Ляля и др.) и завершаясь Табагинским утесом, где днище долины сужается выступом коренного берега и русло становится относительно прямолинейным неразветвленным, а его ширина сокращается до 3 км. Как и Покровский узел, расположенный выше по течению, этот «разбой» в начале XX в. являлся звеном

сопряженных разветвлений [Чалов, Завадский и др..., 2016], причем левобережная пойменная протока Каландарашвили (в меженный период ее относительная водность составляет сейчас 5–7 %, тогда как в прошлом она забирала до 45 % стока и была одним из основных рукавов реки в системе сопряженных разветвлений). Происшедшее затем перераспределение стока сделало наиболее значимым рукав вдоль правого берега, который превратился в основное русло реки, разделившись на две ветви течения и образовав параллельно-рукавное разветвление, левая ветвь которого проходит вдоль крупных островных массивов, примыкающих к левому берегу и сохранивших свой облик и размеры и в настоящее время, правая — вдоль правого пойменного берега (рис. 3.14).

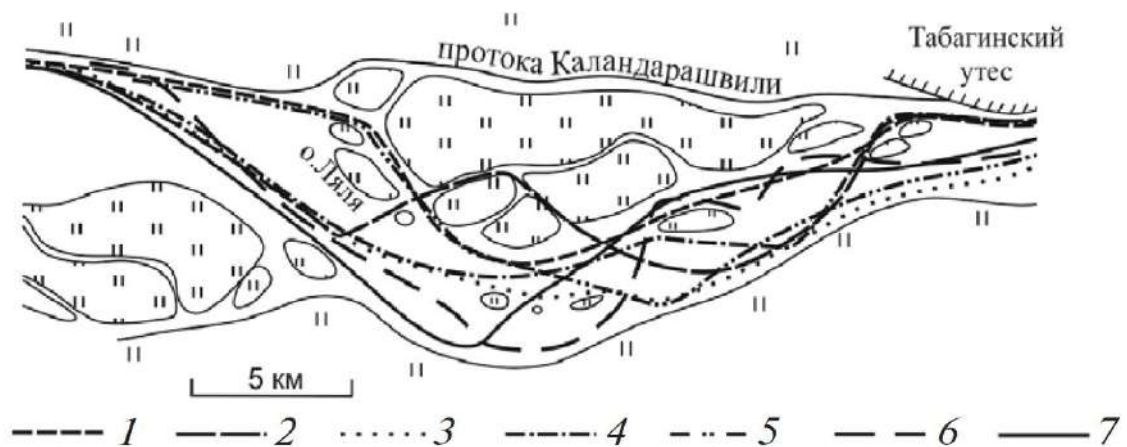


Рисунок 3.14 — Изменения положения судовой ходы в «разбое» Рассолода: 1 — 1934 г.; 2 — 1951 г.; 3 — 1972 г.; 4 — 1982 г.; 5 — 2000 г.; 6 — 2010 г.; 7 — 2017 г.). [Чалов, Завадский, и др., 2019].

Русловые переформирования охватывают в основном активную часть русла, в центральной части которого развиты элементарные острова и крупные осередки, обладающие относительно небольшими размерами ($L_0 = 500\text{--}800$ м, $B_0 = 200\text{--}400$ м). Их формирование идет достаточно интенсивно, особенно если учитывать, что степень устойчивости русла на данном участке одна из самых низких ($Л = 2,8\text{--}3,2$; $K_c = 3\text{--}4,2$). Кроме элементарных, на участке преобладают крупные острова и островные массивы, расположенные между протокой Каландарашвили и основным руслом реки, которые ранее составляли островную основу второго звена сопряженных разветвлений. Размеры этих островов существенно больше (в среднем $L_0 = 3000$ м, $B_0 = 1300$ м). Водность второстепенных протоков за и между ними поддерживается образованием затворов у Табагинского утеса, и поток Лены, стремясь обойти возникшее препятствие, обеспечивает функционирование этих протоков. В районе 1680 км стрелы потока объединяются, русло сужается, возрастают глубины и уменьшается количество островов, и в створе Табагинского утеса русло становится прямолинейным неразветвленным (в нем сосредотачивается до 99 % от общего расхода воды).

Ниже Табагинского утеса, несмотря на то что снова наблюдается расширение днища долины (долина Туймаада) и понижается степень устойчивости русла (в створе Табагинского утеса она максимальна — $L = 10,5-11$; $K_c = 11,5-13$), участок русла протяженностью около 10 км является относительно прямолинейным, неразветвленным, более 90 % стока концентрируется в одном рукаве (шириной до 2,5 км), проходящем вдоль левого пойменного берега, а правобережная пойма расчленяется системой маловодных пойменных протоков (наиболее крупная из них — Хаптагайская, доля стока которой составляет 3 %). Русло характеризуется в основном осередковыми разветвлениями, которые относительно эфемерны, смещаясь и постоянно изменяя свою конфигурацию. Островов в основном русле нет, они встречаются лишь в виде крупных пойменных массивов (о. Мурун, о. Мастыр, о. Бергесе-Уэс, о. Хоптолох), составляющих правобережную пойму (длина каждого — до 4–6 км, ширина — до 2,8 км). Вдоль левого берега, имеющего прямолинейные очертания ниже Табагинского утеса, проходит одноименная протока, пересыхающая в межень и отделяющая от левобережной поймы крупный пойменный массив — о. Улуу-Ары шириной до 4,5 км.

На 1662 км стрежень потока делает изгиб в сторону правого коренного берега, суммарная ширина русла резко увеличивается с 5 до 10 км, в основном за счет протоков вдоль левого берега и разделяющих их островных массивов. Ниже ухвостья песков Уэс-Кумах основной рукав, водность которого достигает 80 %, сливается с протоками, проходящими вдоль правого пойменного берега (Хаптагайская) и проходит вдоль крутого размываемого высокого берега — «Бестяхской» террасы, относительная высота которой достигает 40–45 м над урезом. Отсюда начинается параллельно-рукавное разветвление, верхнее звено которого — *Бестяхский «разбой»* — представлен небольшими островами Чемят и Тигирях, разделяющими две ветви потока, окружающими их отмелями и осередками (главное русло) и системой левобережных пойменных протоков, среди которых выделяется Городская протока. В начале XX в. она была одним из основных рукавов Лены, образующих следующее звено сопряженных разветвления. Среди других протоков выделяются Хорогорская и Хатыстахская, водность которых вместе с Городской составляет сейчас не более 20 %. Крупные острова, расположенные между системой пойменных протоков и основным Бестяхским рукавом (Большой и Малый Хатыстах, Харыялах, Хорогор), имеют значительные размеры (до 8 км в длину и 2–3 км в ширину) и сложную конфигурацию. В первой половине XX века Городская протока была вторым основным по водности рукавом, сопоставимым с Бестяхским рукавом вдоль правого берега. Без учета этих крупных островов степень разветвленности здесь невелика, при этом размеры небольших элементарных островов в центральной части Бестяхского рукава

не превышают 800–1000 м в длину и 200–400 м в ширину. Острова в основном имеют вытянутую форму, похожую на острова, расположенные в центральной части русла в «разбое» Рассолода. Коэффициент формы для элементарных островов составляет в среднем 4,4–5,1. Кроме того, массивные песчаные отмели в Бестяхском рукаве дают начало новым элементарным островам, формирование которых интенсивно происходит в настоящий момент. Наиболее водной является правая ветвь параллельно-рукавного разветвления, проходящая непосредственно вдоль уступа Бестяхской правобережной террасы — она забирает до 60 % стока от общего расхода.

В районе 1643 км происходит разделение русла о. Пономарев на два рукава: левый — Адамовскую протоку — и правый — Буорыларскую, причем в последней вдоль правого берега формируются группа малых островов, частично перекрывающих заход в последнюю и смещающих стрежень потока влево ближе к оголовку о. Пономарев. Отсюда начинается следующее разветвление русла — *Якутский «разбой»*, в пределах которого располагается Якутский водохозяйственный узел. Этот участок охватывает нижнюю часть расширения днища долины Туймаада, замыкающегося Кангаласским камнем, образующим сужение долины Лены и имеющим, как и Табагинский мыс, относительную высоту около 120 м. В настоящее время русло в пределах водного узла представлено параллельно-рукавным разветвлением, которое является вторым (нижним) звеном (продолжением Бестяхского) в общей системе параллельно-рукавных разветвлений и протягивается вплоть до 1630 км, где два основных по водности рукава объединяются в едином русле. Ниже по течению распространена серия чередующихся односторонних разветвлений, завершающаяся (подобно параллельно-рукавным в разбое Рассолода) сужением русла Кангаласским камнем. Основным и наиболее крупным островом в Якутском узле является о. Пономарев, который при его достаточно крупных размерах ($L_0 = 6100$ м, $B_0 = 1250$ м) состоит из нескольких образующих его объединившихся островов (рис. 3.15).

Ранее Якутский «разбой» имел другой морфодинамический тип русла, и предпосылками к формированию здесь параллельно-рукавного разветвления стало происходящее с 1930–1940-х гг. перераспределение стока в сторону правого Бестяхского рукава, водность Городской протоки заметно снизилась. К 1950–1960 гг. Городская протока обмелела и стала второстепенной пойменной, верхнее звено системы сопряженных рукавов, по существу, перестало существовать. Главное течение реки (около 90 % расхода воды) стало полого переваливать от левого пойменного берега выше ее истоков к правому коренному у п. Нижний Бестях. В настоящее время относительная водность Городской протоки только в половодье иногда превышает 15 %, в летнюю

межень колеблется в диапазоне 4–8 % в зависимости от водности года и расположения побочней перед заходом в нее.



Рисунок 3.15 — Изменения положения судового хода в Бестяхско-Якутском разветвлении (а: 1 — 1929 г.; 2 — 1947 г.; 3 — 1958 г.; 4 — 1963 г.; 5 — 1972 г.; 6 — 1982 г.; 7 — 1989 г.; 8 — 1999 г.; 9 — 2010 г.; 10 — 2015 г.) [Чалов, Завадский и др., 2019].

Разветвление русла о. Пономарев сохранилось в ходе всех произошедших трансформаций русла: оно в прошлом составляло звено сопряженных разветвлений, сейчас — вновь сформировавшегося параллельно-рукавного. В нем к началу 1970-х гг. большая часть расхода воды сосредоточилась в левом рукаве — Адамовской протоке (до 70 %), водность бывшей судоходной до 40–50-х гг. правой Буорыларской составляла около 30 %. К настоящему времени их водность практически одинакова, но вместе с тем немного различается в зависимости от фазы водного режима (в межень водность правой Буорыларской протоки возрастает). Она, как наиболее водная, имеет плесовый характер, и только в створе ухвостья о. Пономарев, перед слиянием с Адамовской имеется вторичное разветвление о-вом Сахалин ($L_o = 1800$, $B_o = 400$ м). Ширина протоки в этом месте составляет более 1,5 км. Поэтому возникновение вторичной разветвленности рукава можно считать следствием снижения транспортирующей способности и уменьшением степени устойчивости русла, которое на всем участке не превышает $K_c \leq 3$. Снижению устойчивости способствует и увеличение ширины русла, которая в Якутском узле в 1,5–2 раза больше, чем на участках с другими типами русла, расположенными выше и ниже по течению.

Русловые переформирования, связанные с трансформацией типа русла и его перестройкой, сопровождаются в настоящее время интенсивными размывами в первую очередь левого берега ниже Табагинского мыса и оголовков островной системы ниже захода в Городскую протоку, что приводит к поступлению в реку более 3 млн. м³ в год наносов [Чалов, Завадский и др., 2019]. Перемещаясь затем в Бестяхский и Якутский «разбои», они обуславливают сложные переформирования всей системы параллельно-рукавных разветвлений. В частности, с ним связано обмеление верхней части Адамовской протоки, где на заходе в нее идет образование обширной отмели вдоль ухвостья пойменного массива, а также ее выдвижение в Адамовскую протоку со скоростями от 30 до 200 м/год [Чалов, Завадский и др., 2019]. Одновременно происходит активный размыв оголовка о. Пономарев (9–20 м/год), который отступил за 40 лет (1972–2012 гг.) почти на 1 км, а также рост косы в его ухвостье, что привело к размыву здесь левобережного о. Софон (к 2018 г). Ниже слияния Адамовской и Буорыларской проток в районе 1628 км поток прижимается к правому пойменно-островному массиву первого звена в системе чередующихся односторонних разветвлений, которые составляют следующий по течению узел — Жатайско-Кангаласский.

Жатайско-Кангаласские разветвления представляют собой серию из трех чередующихся односторонних разветвлений, охватывая участок непосредственно ниже слияния Адамовской и Буорыларской проток до Кангаласского камня, где наблюдается

местное сужение днища долины, поток здесь собирается в едином русле, в котором концентрируется до 97–99 % стока, ширина сокращается до 3400 м. В начале XX века эти звенья входили также в состав сопряженных разветвлений, а ныне второстепенные маловодные протоки между островами являются их основными рукавами.

В отличие от расположенного выше Табагинского, в правой (пойменной) части русла Кангаласского сужения наблюдаются небольшие острова (о. Белегес-Арыта, о. Кыйя), разделенные крайне маловодными протоками, водностью до 1–3 %, а суммарная ширина русла больше таковой у Табаги на 600 м. Ниже п. Жатай развит преимущественно один рукав, в котором концентрируется до 85–90 % расхода воды. Ширина основного рукава здесь составляет 1200–1700 м. Маловодные пойменные протоки отделяют от берегов крупные островные массивы, расположенные сначала у правого (о-ва Саты-Талах), а затем (перед Кангаласским камнем) у левого берега (о-ва Нучча-Кумага). Элементарных островов в основном рукаве практически нет, в основном острова приурочены к периферийной части русла и имеют большие размеры (L_0 более 2500 м, максимально до 7–10 км, $B_0 = 1,5–2$, макс. — до 4 км). Ширина основного рукава здесь меньше, чем в параллельно-рукавном русле, однако из-за больших размеров островов и большего количества второстепенных проток суммарная ширина русла здесь сопоставима с шириной в Якутском и Покровском узлах — до 6–7 км. Степень разветвленности русла здесь невелика, большинство островов имеют изометричную или неправильную форму. Эти изменения в морфологии и параметрах русла и связанных с ним островов коррелируют с постепенным ростом устойчивости русла и, соответственно, относительно слабой интенсивностью переформирований. Островные массивы, формирующие чередующиеся односторонние разветвления, достаточно устойчивы. По результатам натурных измерений не отмечено изменений относительной водности проток между островами односторонних разветвлений и в основном рукаве. Это свидетельствует о преимущественно стабильном положении стрежневой зоны потока, о его концентрации в одном рукаве вне зависимости от фазы водного режима, при этом морфология самого разветвления остается неизменной. Как правило, водность второстепенных проток среди островов — Эселях, Спасской, Тулагинской, Петровской Курьи, протоки Кюэх-Кулусун составляет не более 1–3 % в меженный период, а расположенных непосредственно перед Кангаласским камнем — 3–4 %.

На этом фоне сохраняется тенденция роста и смещения отмелей и кос в ухвостьях островов (о. Жатайский) и пойменно-островных массивов, составляющих односторонние разветвления, вниз по течению. Это приводит к усложнению судоходных условий, в

частности к перекрытию отмелями в нижней его части захода в акваторию Жатайского ССРЗ (судоремонтного завода).

Расширение днища долины ниже **Кангаласского камня** (с 3,5 до 10–12 км) обуславливает уменьшение степени устойчивости русла, более интенсивные русловые переформирования, усложнение морфодинамического типа русла. Здесь русло вновь образует чередующиеся односторонние разветвления, однако происходящие (начиная со второй половины и особенно с конца XX века) переформирования привели к тому, что в верхнем звене чередующихся разветвлений непосредственно ниже Кангаласского камня произошла трансформация рукава, проходящего вдоль пойменного левого берега — Буденновской протоки. Ее водность постепенно возрастала, и в 2021 г. составляла около 45 % от общего расхода воды в реке (против 25 % в 1970-е гг.), что привело к началу формирования здесь параллельно-рукавного разветвления с уже упомянутым левым рукавом — Буденновской протокой — и правым, проходящим вдоль правого пойменного берега. На 1575–1555 км поток проходит вдоль вогнутого левого берега, огибая группу островов у правого (о. Ат-Арыта, о. Куолай, о. Адагай), и затем вновь возвращается к нему. Положение стрежня потока на перевале зависит от положения отмелей и кос в устьях о-вов Чыпчал и Нирайик, за которыми находится также устье маловодной протоки Хомустах. Продолжающийся размыв вогнутого левого берега в вершине пологой излучины ($l/L = 1,45$), которую образует русло, способствует усилению его направляющего воздействия и, как следствие, более крутому перевалу к правому.

С 1552 км начинается **Намский узел разветвления**, который также характеризуется значительной шириной днища долины (11–13 км) и, как следствие, большим количеством проток, в том числе Намской, составляющей левый рукав бывшего двустороннего прибрежного разветвления и отделяющей в настоящее время о-ва Харыялах и Нирайик от левого берега. Ее водность в среднем сейчас составляет около 40–45 % (в 1970-е гг. — 15–17 %). До 70-х гг. XX в. русло здесь было прямолинейным с двусторонними разветвлениями, занимая среди них центральное положение. В этом основном рукаве (75 % в 1970-е гг.) располагались в шахматном порядке массивные побочни длиной до 6 км и шириной до 3–4 км. В первой половине 80-х гг. и до конца XX в. произошло отторжение побочней, образование осередков, последующее их зарастание и превращение в острова длиной 1,2–2 км, шириной 400–600 м. В результате здесь сформировался новый «разбой», в котором за последние 25 лет произошли сложные переформирования, которые привели к образованию параллельно-рукавного разветвления. Две ветви потока разделены здесь рядом недавно образовавшихся элементарных и малых островов и подвижных осередков [Чалов, Кирик, 2015]. Большая

часть стока воды в половодье (55 %), сосредотачиваясь в левобережной Намской протоке, способствует размыву левого берега (в районе п. Графский берег) со средней скоростью 8–10 м/год. Однако еще 5 лет назад основной сток воды в половодье проходил в правой части русла, переваливая от о. Харыялах к правому берегу (в районе островов Заливных), огибая массивные осередки, вызывая локальные переформирования (рис. 3.17).

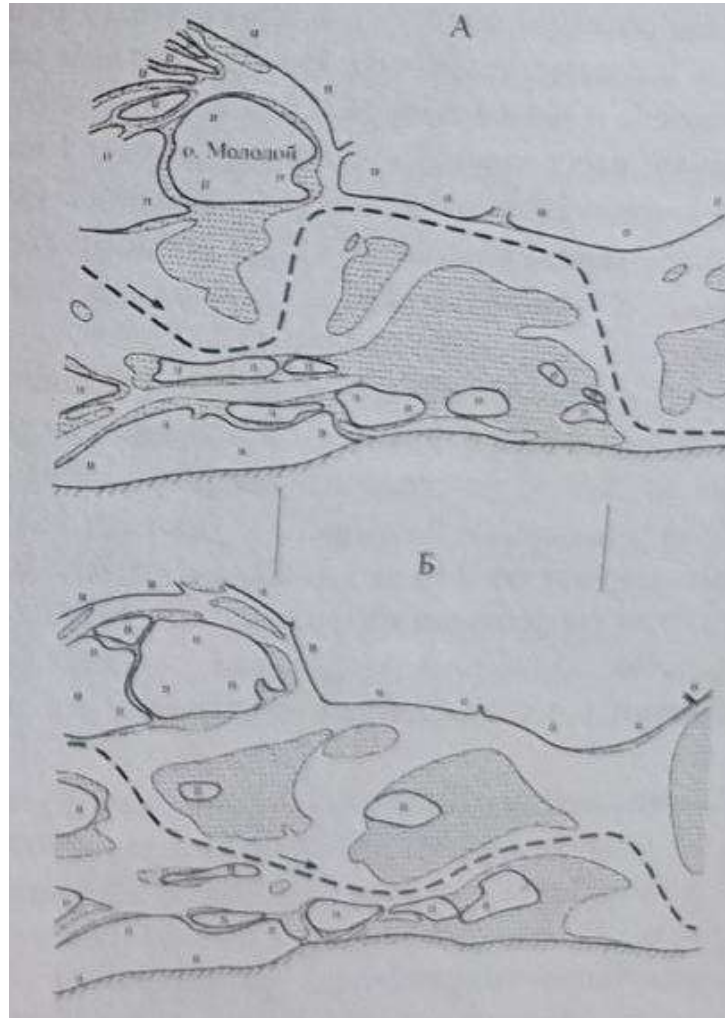


Рисунок 3.17 — Переформирования Намского узла, планы русла и положение судового хода в 1974 г. (А) и 2011 г. (Б) [Чалов, Кирик, 2015]

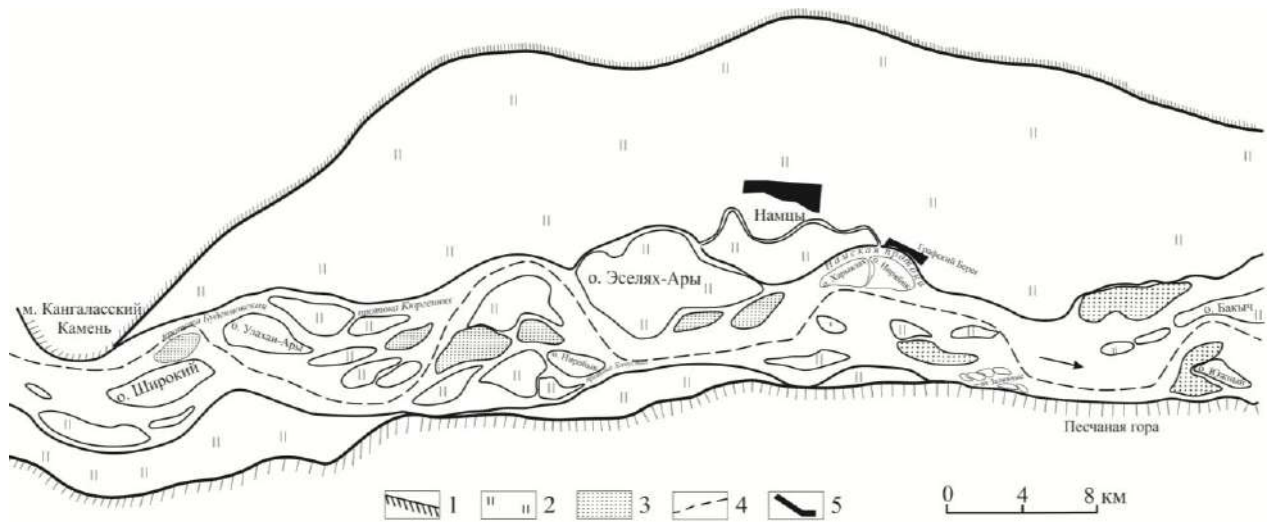


Рисунок 3.18 — Общая схема узлов разветвления на р. Лене ниже Кангаласского мыса: 1 — коренные борта долины; 2 — высокая и низкая пойма; 3 — прирусловые отмели, осередки; 4 — положение судового хода; 5 — населенные пункты.

Хайтыалаахско-Атаринское разветвление охватывает участок русла с 1535 по 1495 км и является одним из наиболее морфологически сложных и затруднительных для судоходства участков на средней Лене. Сохраняющаяся большая ширина днища долины (8–12 км), местные источники поступления наносов в русло и благоприятные условия для регулярного формирования ледовых заторов приводят к активным русловым деформациям, переформированию островов и рукавов. На первых 5–7 км участка русло проходит вдоль высокой (до 25 м) террасы — «Песчаной горы», сложенной песчаными отложениями, сцементированными мерзлотой, которая тем не менее является источником поступления в русло наносов и, несмотря на прямую береговую линию, оказывает направляющее воздействие на поток (рис. 3.19). С 1525 км, сразу после перевала потока от правого высокого берега формируется одностороннее разветвление, а вдоль правого берега располагается обширная отмель, включающая в себя помимо крупных осередков и ряд островов (о. Южный). Слева располагаются крупные о. Баакыч (Багычча) — $L_o = 8900$ м, $B_o = 2230$ м и расположенный ниже о. Кенели с $L_o > 6100$ м, $B_o = 1750$ м. Они характеризуются сложной формой, как и большинство больших прибрежных островов, находящихся вне активной части русла.

За о-вами Баакыч и Кенели вдоль левого берега расположена Хайтыалаахская протока, сейчас относительно маловодная (15–17 %), изобилующая отмелями и небольшими прибрежными островами сложной формы с большим разбросом ширины ($L_o = 1–2$ км, $B_o = 300–700$ м). Ранее (в начале 1960-х гг.) из-за заторных явлений произошло резкое увеличение ее водности, поток направился в нее по поперечной протоке между о-

вами Баакыч и Кенели, и Хайтыалаахская протока стала частью трехрукавного звена разветвлений вплоть до 2000-х годов, пока поперечная протока не была перекрыта отмелями. В последние 10–15 лет увеличение крутизны перевала потока от Песчаной горы к о. Баакыч и одновременный рост правобережного побочня способствовали экстремальному размыву берега о. Баакыч ниже его оголовка со скоростями до 25–30 м/год, увеличению кривизны русла и более направленному перевалу потока обратно к правому берегу ниже по течению в направлении к заходу в правый рукав нижележащего узла разветвления.

Трехрукавное Хайтыалаахско-Атаринское разветвление помимо упомянутой выше Хайтыалаахской протоки образовано также Центральной (водность до 20 %) и правой — Атаринской (Ат-Арынской) (60–65%), последние осложнены островами второго порядка и крупными осередками, приводящими к изгибам динамической оси потока.

В настоящее время большая часть стока проходит в правом рукаве — Ат-Арынской протоке вдоль островов Берелех и Ынах-Ойбоно. До 1959 г. этот рукав также был основным, но в последующий период, вплоть до 2005 г., таковым стал левый — Хайтыалаахская протока. Заход в него, располагаясь между о-вами Баакыч и Кенели, ориентирован почти поперек основного направления течения реки. Этот рукав, сливаясь с левобережной протокой, делает крутой поворот возле пойменного берега и далее образует две пологие излучины, объединяясь в районе ухвостья о. Сухого с Прямой протокой — центральным рукавом узла разветвления. В 1970-е гг. [Чернышов, 1973] была предпринята попытка сделать основным судоходным рукавом центральный — Прямую протоку, однако разработанные дноуглубительные прорези быстро заносились, что было обусловлено большим количеством смещающихся побочней и отмелей в русле. Слияние Атаринской протоки и объединенного рукава, образованного Прямой и Хайтыалаахской протоками формирует узел сопряжения с концентрацией стока 96%.

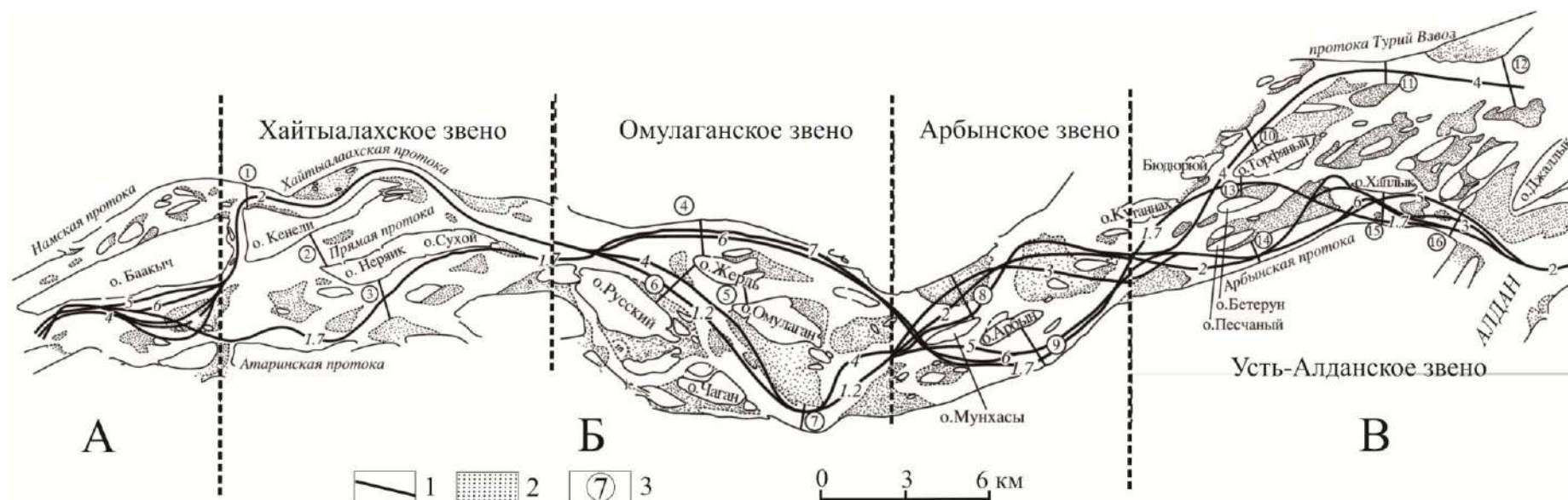


Рисунок 3.19 — Схема Хайтыгалаахско-Атаринского, Омулаганского, Арбынского и Усть-Алданского звеньев разветвлений средней Лены.

Разветвления: А — односторонние; Б — сопряженные; В — устьевое в узле слияния с Алданом. 1 — положение трассы судового хода в разные годы (1947–2011 гг.); 2 — прирусловые отмели; 3 — створы измерения расходов воды.

С начала XXI в. ситуация стала кардинально изменяться, обусловленная возрастающим влиянием перевала потока от о. Баакыч в правобережную часть русла к истокам Ат-Арынской протоки. Поперечная протока между островами Баакыч и Кенели осталась в динамической тени, где начали формироваться массивные отмели, перекрывшие заход как в Атаринскую и в Прямую протоки, так и в поперечную, обеспечивающую поступление воды в Хайтыалаахскую протоку. Эти русловые переформирования отразились на перераспределении стока воды в узле разветвления. Первое время левый и правый рукав были одинаковыми по водности, однако с 2005 г. водность Атаринской стала возрастать. В 2011 г. Хайтыалаахская протока в истоках (поперечная ее часть) забирала 10 % расхода воды (в 2020 г. — 9 %), Прямая протока — 17 % расхода (в 2020 г. — 20 %). Соответственно 65–70 % расхода в последнее десятилетие проходит в правом рукаве — Ат-Арынской протоке, которая стала интенсивно развиваться, а Прямая осталась относительно мелко- и маловодной, с обилием отмелей и осередков. В Ат-Арынской протоке в настоящее время стрежень потока извилистый, огибающий побочни, располагающиеся в шахматном порядке. Помимо о. Баакыч, интенсивный размыв также происходит и у о. Кенели со стороны как Прямой, так и Хайтыалаахской проток (средняя скорость размыва — до 18 м/год), что в дальнейшем при полном размыве повлечет за собой отмирание нижней части этих проток.

Отличительной особенностью, определяющей динамику данного узла, являются ледовые явления, которые проявляются главным образом в виде образования заторов. Поток, обходя ледяную «плотину», размывает боковые рукава, которые со временем могут превращаться в основные. Еще в 40-е гг. XX в. левый рукав — Хайтыалаахская протока — был маловодным, узким и мелким, сток воды распределялся в основном между протоками Прямой и Ат-Арынской. Разработка его до состояния основного судоходного рукава, в котором проходит в разные фазы режима от 30 до 42 % расхода воды в реке, произошла благодаря систематическому образованию заторов, перекрывающих практически все русло; в обход затора поток устремляется в поперечную протоку между островами к левому берегу реки. Развитие Хайтыалаахской протоки привело к усложнению всего разветвления, которое превратилось из двухрукавного (протоки Прямая и Ат-Арынская) в трехрукавное и обрело более сложную картину рассредоточения стока по рукавам.

Следующие *Приалданские разветвления* (Омулагнское и Арбынское) протягивается от слияния рукавов Хайтыалаахско-Атаринского разветвления до слияния с Алданом. Особенности морфометрии русла и островов, русловых переформирований здесь обусловлены главным образом подпорным воздействием притока, которое

распространяется в отдельные годы до 40–60 км вверх по течению от устья р. Алдан, водность которого составляет до 30–35 % от расхода воды на Лене. Почти 50-километровый отрезок разделен на два звена разветвлений — Омулаганское и Арбынское. В нижней части участок характеризуется разветвлением дельтового типа. Здесь ширина днища долины возрастает в 1,5 раза, суммарная ширина русла достигает 8,5 км.

Наиболее крупными островами в Омулаганском узле являются о-ва Жердь (Серидиес) и Омулаган, их длина достигает 3,5–4 км, ширина — 1,3–1,8 км. Основным по водности здесь является сейчас левый рукав, забирая до 70 % расхода, 30 % сосредоточено в правом рукаве и в правобережных пойменных протоках. Небольшое искривление стрежня потока к левому берегу в левом рукаве связано с формированием массивных побочней у оголовка о. Жердь, которые частично перекрывают заход в рукав слева от него. Ниже по течению конфигурация левого пойменного берега изменяется, ряд крупных островных массивов (о. Джанда) способствуют отклонению потока вправо, а ширина русла (за счет стеснения этими массивами) сокращается до 4,3 км. До начала 1990-х гг основным по водности был правый рукав, который, огибая о. Омулаган, способствовал формированию пологой излучины $l/L = 1,41$. Развитие выше по течению Атаринской протоки и увеличение ее водности постепенно способствовало перемещению потока влево, а правый оказался за выступом о. Нуча-Ары, и его водность стала сокращаться. Истоки левого рукава и рукава между о. Жердь и Омулаган напротив, развивались. В определенный период (на рубеже XX–XXI веков) соотношение водности в левом и правом рукавах было практически равноценным, что вместе с аналогичным соотношением выше по течению в Хайтыалаахском узле формировало небольшой участок параллельно-рукавного разветвления. Возобновление сопряженной системы с преобладанием стока в левом рукаве произошло к 2005–2007 г [Чалов, Кирик, 2015].

Такие переформирования вызывали соответствующие трансформации в нижележащем Арбынском узле, сформированном о-вами Мунхасыт, Арбын, объединенными отмелями и расположенным ниже о. Нелегер. В настоящее время большая часть расхода воды сосредоточена в правом рукаве (54–80% в зависимости от водности года и фазы водного режима); левый рукав, хотя и ненамного менее многоводный, но сток в нем рассредоточен по вторичным разветвлениям и особенно по протокам в узле его слияния с правым рукавом (протока Верхний Взвоз). Однако по данным 1969 г. наиболее водным рукавом был левый, в котором сосредотачивалось до 75 % расхода воды. Постепенное развитие правого рукава привело к тому, что аналогично вышерасположенным узлам Арбынский стал частью параллельно-рукавного разветвления, и затем, по мере увеличения водности левого рукава Омулаганского узла, все большую водность

приобретал поток справа от о. Арбын (Арбынская протока), непосредственно сливающийся ниже по течению с Алданом.

Ниже по течению становятся четко выраженными две основные ветви: правая (Арбынская протока) и параллельная ей левая (протока Турий Взвоз), разделенные архипелагом многочисленных островов и осередков, преимущественно относительно небольших размеров, среди которых высока доля элементарных и малых. Средняя длина островов на участке — от 1,5 до 4 км, ширина — от 400 до 1200 м. Арбынская протока, являясь в настоящее время большей по водности (до 67 %), образует Лено-Алданскую стрелку, в то время как протока Турий Взвоз, забирая соответственно около 30% расхода, образует длинное слияние с Алданом, объединяясь с основным потоком уже ниже устья Алдана. Арбынская протока характеризуется относительно малым количеством отмелей и осередков, проходит вдоль высокой поймы, имеет сравнительно небольшую ширину (до 1,3 км); при этом периодически происходит отвлечение части ее стока по поперечным протокам между островами в центральной части русла в протоку Турий Взвоз. Такое цикличное развитие проток (уменьшение водности Арбынской и возрастание водности протоки Турий Взвоз, и наоборот), происходящее каждые 15–20 лет, вызвано подпором или спадом уровней при слиянии с Алданом. Большая водность правого рукава, перемещение в него большей части потока и формирование «короткого» слияния характерны в периоды средних и высоких половодий на Лене и преимущественно бесподпорных условий (Лена в эти годы подпирает Алдан). Наоборот, при высоких половодьях на Алдане он подпирает Лену, обуславливает сокращение расхода воды в Арбынской протоке и развитие системы проток «длинного» слияния вдоль левого берега (табл. 3.5).

Таблица 3.5 — Характеристика водности рукавов в Усть-Алданском узле разветвления в зависимости от характера половодий и подпорных условий в устье Алдана [Ермакова, Кирик, 2006, с дополнениями].

Годы	Протока		Характер половодий	Подпорные условия для Лены
	<i>Правая (Арбынская)</i>	<i>Левая (Турий Взвоз)</i>		
До 1925	+	-	Высокие и средние	Бесподпорные
1926–1952	-	+	Низкие	Подпорные
1953–1968	+	-	Высокие и средние	Бесподпорные
1969–1980	-	+	Низкие	Подпорные
1981–1993	-	+	Низкие	Подпорные

1994–2007	+	-	Высокие и средние	Бесподпорные
2008–н.в.	-	+	Низкие	Подпорные

Таким образом, наиболее сложным периодом в процессе трансформации сопряженных разветвлений при перемещении основной доли стока из левого в правый рукав и наоборот, является период, в который наблюдаются приблизительно равные по водности ветви потока и формируются параллельно-рукавные разветвления, которые способствуют обмелению центральных протоков, формированию большого количества отмелей и элементарных островов, и оптимальной является ситуация, когда судовой ход закрепляется в одной системе рукавов, как это происходит в настоящее время.

Белогорский участок. Алдан, являясь крупнейшим притоком Лены, увеличивает ее водность на 30–35 %, благодаря чему в условиях свободного развития русловых деформаций создаются наиболее сложные, превосходящие по своим морфометрическим параметрам русловые разветвления. Ниже устья формируются несколько односторонних разветвлений, в сумме составляющих порядка 30–40 км. Основной расход концентрируется в правом рукаве, в то время как острова различных размеров (от элементарных до средних и больших) приурочены к левобережной пойменной части, разделяясь обширными отмелями. Длина наиболее крупных островов достигает 7 км, а ширина — 3 км (рис. 3.20).



Рисунок 3.20 — Космоснимок участка русла Лены ниже слияния с Алданом.

Следующие 30 км занимает Белогорский «разбой», который сформировался в расширении днища долины и замыкается сужением русла в створе выступа правого берега — Белой горы (рис.3.21). В верхней части русло разделяется на ряд рукавов, наиболее водным из которых является левый, и системы правобережных рукавов и проток, разделенных пойменно-островным массивом, расчлененным второстепенными протоками на ряд крупных островов ($L_o = 6–11$ км, $B_o = 2–3,5$ км). В нижней части участка (ниже

ухвостьев островов Сур, Еловый, Ыстаннах, Тенгелиях) поток переваливает от левого пойменного берега к правому коренному (Белая гора), а основной рукав при этом характеризуется осередковыми и элементарными островными разветвлениями. В пределах перевала поток распластывается по акватории шириной до 3,3 км с одним небольшим островом (о. Чаечий) посередине русла, линейные размеры которого по сравнению с пойменно-русовыми разветвлениями уменьшаются в 5–7 раз. На эту акваторию смещаются косы, развивающиеся в ухвостях вышележащих островов (Еловый, Сур), усложняя морфологию русла. Периодически происходит отторжение этих кос и побочней, вследствие чего образуются подвижные осередки, вызывающие вместе с о. Чаечий рассредоточение стока на перевале. В результате водность судоходного рукава снижается иногда до 20 % и менее от общего расхода воды в реке, искривляется динамическая ось потока на перевале, судовой ход становится извилистым среди отмелей. Это обуславливает снижение транспортирующей способности потока и аккумуляцию наносов (при уровне около 3 м над проектным сток взвешенных наносов по натурным измерениям уменьшается по длине Белогорских перекатов с 2700 кг/с до 1100 кг/с, т.е. почти в 2,5 раза), отражая здесь общую аккумуляцию наносов. Кроме того, сужение русла перед мысом правого коренного берега (Белой горой) способствует, во-первых, динамическому подпору потока во время половодья и, во-вторых, пересечению пойменного потока, направляющегося в пределы левобережной поймы ниже Белогорских перекатов.

В Белогорском пойменно-русовом разветвлении водность левого основного рукава относительно постоянна и составляет 55–60 %, второго основного, исток которого расположен за плечом правого коренного берега, — около 20 %. При этом параметры островов, составляющих разветвления 2-го порядка в правом основном рукаве, существенно меньше образующих центральный пойменно-островной массив и составляют ($L_0 = 1,5–4$ км, $B_0 = 0,6–1,1$ км). В одностороннем разветвлении ниже Белогорских перекатов левый прибрежный рукав забирает 25–30 % расхода воды в зависимости от фазы водного режима и водности года. Таким образом, на перевале потока между двумя островными системами проходит 25–45 % стока воды в реке.



Рисунок 3.21 — Общая схема Белогорского «разбоя» средней Лены [Чалов, Кирик, 2015].

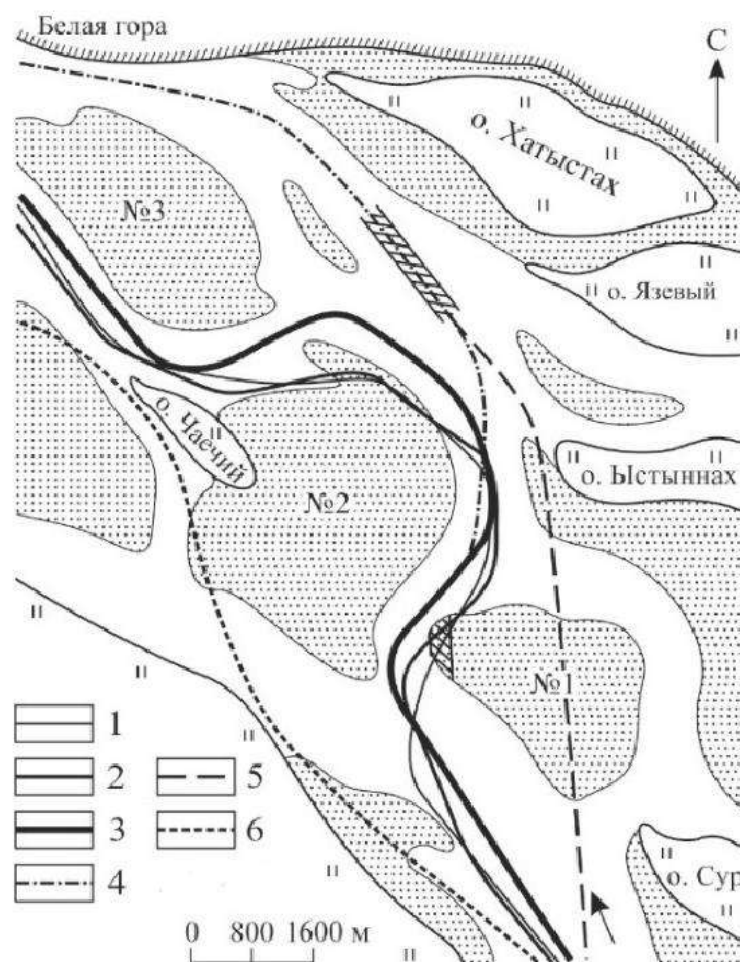


Рисунок 3.22 — Изменение положения судового хода на Белогорских перекатах (без проведения дноуглубительных работ) в 2012–2020 гг. и в перспективе (план русла 2020 г.): 1 — 2012 г.; 2 — 2015 г.; 3 — 2020 г.; 4 — прогнозируемое на 2021–2022 гг.; 5 — то же в течение следующих 5 лет; 6 — то же в отдаленной перспективе.

Современное состояние Белогорского разветвления обусловлено, прежде всего, обилием кос в ухвостьях островов и осередков, образующихся при их отторжении, причем наиболее интенсивно этот процесс идет в нижней части участка в месте перевала потока к

правому берегу, он сопровождается также извилистостью динамической оси потока. В последнее время некоторые из этих кос закрепились растительностью, что, с одной стороны, способствует их стабилизации, а с другой — росту островов в длину. На фоне общего трансгрессивного смещения русловых форм (в частности, центрального островного массива, образующего пойменно-русловое разветвление) сокращается акватория, в пределах которой осуществляется перевал потока и улучшаются условия судоходства.

Ниже 1340 км Лена протекает вдоль правого коренного берега, преобладают односторонние разветвления, образованные прибрежными островами, отделенными от берега относительно маловодными протоками (до 15–20%) — Сангарской, Лебединой, Карелинской, Орулганской. Основной правый рукав проходит вдоль горного коренного правого берега, представленного отрогами и склонами хребта Орулган. Левый берег — пойменный, вдоль него сосредоточено большое количество островов, преимущественно крупных, разделенных маловодными пойменными протоками и устьями небольших левых притоков. Средние размеры островов на участке от п. Сангар до устья Вилюя (1315–1240 км) превышают 5 км в длину и 2 км в ширину, причем максимальные значения $L_0 = 11$ км, $B_0 = 3,8$ км.

Участки Монастырский, Черпальский, Сахам. Отрезок русла в районе устья р. Вилюй (1220–1240 км) характеризуется тем, что здесь степень разветвленности русла резко сокращается, поток собирается в едином неразветвленном русле. Исключение составляют лишь несколько маловодных, мелких проток по левобережью непосредственно выше устья притока. Сама Лено-Вилюйская стрелка представлена островным массивом длиной 14, а шириной 4,1 км, отделенным пойменной протокой Чаркан-Аяга от остальной поймы. Ширина русла на данном участке резко сокращается в 3 раза (с 12 до 4 км, минимально — 3750 м), и на протяжении 7–9 км ниже по течению его ширина остается в пределах этих значений. Судовой ход располагается вдоль правого коренного берега, отклоняясь к середине русла только перед оголовком островов, составляющих нижележащий узел разветвления. Это отклонение вызвано влиянием плеча правого коренного берега и главным образом выходами коренных пород (песчаников) в русле непосредственно перед оголовками о-вов Люккяр, усиливающих струенаправляющее воздействие плеча коренного берега. Среднегодовое стока Вилюя составляет 10–12 % от стока Лены, увеличивая (вместе с Алданом) водность Лены по сравнению с участком в районе г. Якутска в 2 раза (с 7100 м³/с до 13 000 м³/с), что в условиях свободного развития русловых деформаций приводит к формированию ниже по течению цепочки самых сложных в морфологическом и динамическом плане

разветвлений, превосходящих по своим размерам прочие узлы разветвлений выше по течению, русло разделяется островами разных размеров на 10–15 проток и рукавов одним поперечнике, а водность даже самых многоводных не превышает трети от общего расхода воды в реке.

Ниже описанного практически неразветвленного короткого участка русла располагаются три следующие друг за другом звена сложных параллельно-рукавных разветвлений — Монастырское (1240–1195 км), Черпальское (1195–1135 км) и Сахам. (1135–1095 км), каждое из которых образовано десятками больших и малых островов (рис.3.23). Общая длина участка по судовому ходу — 145 км.



Рисунок 3.23 — Общая схема (космоснимок) разветвленного русла нижней Лены ниже устья Виллой. 1 — границы звеньев разветвлений; 2 — положение стрежневой зоны потока в левом и правом основных рукавах и во вторичных разветвлениях основных рукавов; 3 — то же в субпараллельных рукавах; 4 — то же в диагональных рукавах.

Вся система разветвлений Монастырское-Черпальское-Сахам составляет единое параллельно-рукавное разветвление нижней Лены, точнее — наиболее сложную часть такового, охватывающего реку вплоть до с. Жиганск. На границах звеньев разветвлений, особенно между Монастырским и Черпальским, в общей акватории между ухвостом верхнего звена и оголовком нижнего сохраняются и четко прослеживаются (на космических снимках и при анализе скоростного поля потока) две динамические оси — левая, выходящая из левого рукава Монастырского узла, направляющаяся затем в левый же рукав нижележащего Черпальского, и правая, направляющаяся в правый рукав. Визуально это хорошо подчеркивается цветом водной поверхности из-за разницы в мутности воды левой виллойской ветви потока и правой — ленской.

Первое Монастырское разветвление имеет протяженность 36 км (по судовому ходу 40.1 км) при наибольшей ширине русла (с островами) 12.6 км. В нем насчитывается 29 островов различных размеров, из которых 15 расположено в центральной части русла между левым и правым основными рукавами. Остальные острова образуют вторичные разветвления основных рукавов и на заходе в них. Между Монастырским и Черпальским разветвлениями, где русло сужается более чем в 2 раза (до 5.1 км), располагается единая

акватория без островов длиной около 4 км. Черпальский узел длиной 55 км имеет наибольшую ширину (до 28 км), что является абсолютным максимумом для всей Лены. Количество островов в центральной части между левым и правым основными рукавами — более 40, образующих более 15 разветвлений рукавов (из них 6 в их периферийной части). В разветвлении Сахам наибольшая суммарная ширина реки — 16.6 км при длине участка 43.3 км, по судовому ходу — 46 км. Количество островов между левым и правым рукавами — 36, из них образующих разветвления 2-го порядка в рукавах — 5, прибрежных — 8. Между разветвлениями Черпальским и Сахам ширина русла сокращается до 11 км, но в отличие от сужения перед Черпальским разветвлением здесь сохраняются прибрежные разветвления как с левой, так и с правой стороны русла, образованные несколькими островами. Кроме того, между прибрежными разветвлениями в единой акватории на заходе в левый и правый рукава разветвления Сахам сближения и дальнейшего разделения основных по водности рукавов не происходит, и заход в левый рукав разветвления Сахам располагается выше ухвостья последнего острова Черпальского звена — Булун-Станаах.

Монастырское разветвление (1240–1195 км), начинающееся 7–8 км ниже устья Вилюя, образовано группой центральных островов — Джура, Оймякон, Бахсы, Сордоннох и др. (рис. 3.24). Их положение и водность левого и правого (судоходного) рукавов в ретроспективном плане менялась незначительно. Острова разделяют реку на два основных рукава, между которыми гидравлическая связь осуществляется по маловодным межостровным протокам, водность наиболее крупной из которых (диагональной между о. Сордоннох и о. Оймякон) составляет сейчас 12.9 % (створ № 5). Водность основных рукавов — левого и правого — в узле разветвления перед оголовком центральных островов составляет около 40 и 60 %, (створы № 6 и № 8). В левый рукав из диагональной протоки (створ № 7) поступает всего 6 %, остальная часть воды по протокам между о-вами Оймякон, Бахсы и Джура частично возвращается в правый рукав. В прибрежные протоки за о-вами Люккяр перед разделением русла на основные рукава поступает не более 8–10 %, в отдельные годы — 2–3 % от основного расхода даже при относительно высоких уровнях воды. На заходе левый рукав (у о. Монастырский) делится на две приблизительно равные по водности протоки (около 18 % — створ № 4). Ниже по течению в нем находится цепочка островов и осередков, образующих сопряженные разветвления 2-го порядка; в результате весь расход левого рукава собирается лишь в створе № 6 между звеньями этих разветвлений. Правый рукав представлен практически неразветвленным руслом, отдавая лишь незначительную часть стока (или принимая его) в межостровные или прибрежные протоки. Лишь на 1210–1205 км у правого берега

расположен остров Чарапчы, отделенный от основного русла протокой Чынгырыкан, который не оказывает влияние на морфологию и динамику разветвления.



Рисунок 3.24 — Монастырское разветвление (1240–1195 км по судовому ходу). Сплошными линиями показано положение стрежня потока в основных по водности рукавах, пунктирными — квазипоперечные и субпараллельные рукава.

Черпальское разветвление находится ниже Монастырского после того, как стрежни потока сближаются в единой акватории и вновь расходятся по двум основным рукавам (рис. 3.25). Центральная часть русла, во многом определяющая внешний облик и динамику всего разветвления, заполнена крупными и многочисленными малыми островами, представляя собой своеобразный архипелаг, расчлененный на части как маловодными пойменными протоками, так и более крупными продольными, субпараллельными основным рукавам, и диагональным рукавом, разделяющим весь островной массив на верхнюю (о-ва Чарпалар, Уэс-Станаах) и нижнюю (о-ва. Бол. Соболиный, Булун-Станаах, Хара-Ары и др.) части. В прибрежной части русла, за выступом (мысом) правого коренного берега и конусом выноса р. Лямпушки расположены крупные о-ва Тополиный (Тирэх), Тисэнгдэ на заходе в правый рукав; в левом рукаве, начиная от захода в него, и в центральной части расположена цепочка о-вов Тыатенгелиях и ряд других, меньших размеров, которые составляют в нем систему сопряженных разветвлений второго порядка.

Как и в Монастырском, основной особенностью Черпальского разветвления является его значительная ширина (до 28 км), преобладание водности правого основного рукава (42.2 %) и его расположение вдоль высокого коренного берега. Продольные рукава посередине реки в верхней части архипелага (между о-вами Черпальскими, Чарпалар и Уэс-Станаах) сравнительно маловодны (их водность — 4.5 и 9.2 %). Левый рукав сосредотачивает 31.2 %, но из-за большого количества островов и осередков в нем такое

значение водности достигается лишь в нижней части (ниже о. Тыатенгелиях). Диагональный рукав, отходящий влево у оголовка о. Бол. Соболиный забирает 14.5 % стока, но 12 % уходит в продольный рукав в нижней части архипелага (между о-вами Бол. Соболиный и Хара-Ары).

Относительно небольшими островами второго порядка (Митька-Беляга — $L_0=3900$ м, $B_0=900$ м; и Рысий — $L_0=2600$ м, $B_0=490$ м) правый основной рукав на перевале потока, огибающего прибрежные острова, к правому коренному берегу, разделяется на три протоки, между которыми в многолетнем плане происходит периодическое перераспределение стока (и изменяется трасса судового хода).

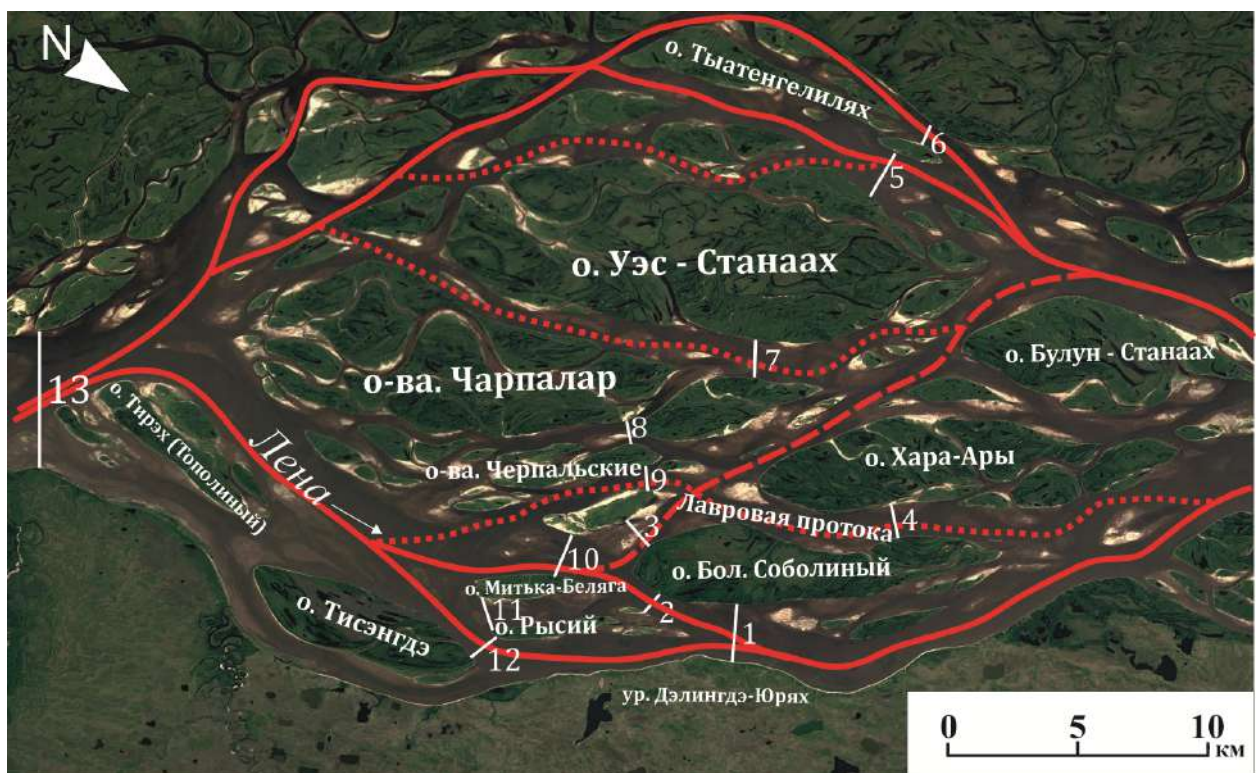


Рисунок 3.25 — Черпальское разветвление (1195–1135 км по судовому ходу) и расположение створов измерения расходов воды в июле 2021 г. Сплошными линиями показано положение стрежня потока в основных по водности рукавах, пунктирными — квазипоперечные и субпараллельные рукава.

Протока между о-вами Рысий и Митька-Беляга посередине правого основного рукава мало изменяет свою водность, практически всегда маловодная и мелкая. Периодичность в изменении водности левого и правого рукавов возле этих островов совпадает по времени с большим или меньшим отвлечением части стока в диагональный рукав перед о. Бол. Соболиным и из него в субпараллельную Лавровую протоку. В годы, когда возрастает водность протоки справа от о. Рысьего (вдоль правого коренного берега), заход в диагональный рукав мелеет, доля стока в нем сокращается в 2–2,5 раза. Эти

колебания водности рукавов и периодическое их развитие связаны со смещением кос и отмелей в устье правобережных о-вов Тисэнгдэ и Тирэх, перекрывающих заход в правый рукав у о. Рысьего, превращая его в длинную затонину вдоль правого коренного берега, и последующим их отторжением, благодаря чему поток вновь перемещается в правую протоку у о. Рысьего. Одновременно на заходы в диагональный рукав и на протку слева от о. Митька-Беляга надвигается массивный побочень, смещающийся вдоль верхней части центральной группы островов, перекрывая и способствуя их обмелению. Такие переформирования во второй половине XX века происходили каждые 10–12 лет, но начиная с 1990-х гг. цикл продолжается в среднем 7–9 лет. Концентрации стока и сохранению положения судового хода в ней способствует наличие направляющего воздействия правого коренного берега, благодаря которому русло вдоль него имеет плесовый характер и, даже несмотря на наличие разветвлений 2-го порядка (о. Калымарова, о. Ат-Баса на 1155 км), бо́льшая часть расхода все равно проходит непосредственно вблизи правого берега. Линейные размеры островов на участке различаются в зависимости от их расположения в русле и водности рукава, в котором они расположены, изменяясь в широких пределах от 600–800 м до 14 км в длину и от 350–600 м до 5 км в ширину.

Ниже Черпальского звена в устье о. Бол. Соболиного находится участок Ыт-Халбыт, морфология и рассредоточение стока на котором определяются, прежде всего, слиянием правого судоходного рукава у о. Бол. Соболиного и Лавровой протоки, а также ряда субпараллельных протоков между островами в центральной части русла вышележащего Черпальского узла (о. Булун-Станаах и о. Хара-Ары). Рост и отторжение кос в устьях этих островов, а также за плечом правого коренного берега (перед оголовком о. Ыт-Халбыт) оказывают существенное влияние на переформирования русла на этом участке и положение судового хода. По правобережью расположены крупные прибрежные о-ва Ыт-Халбыт (средняя длина — 4200 м, ширина — 1800 м, максимальная длина — 8100, ширина — 2400 м), образовавшиеся ниже выступа правого коренного берега и конуса выноса из правобережного притока. За последние 60 лет (начиная с конца 1950-х гг.) ниже оголовка о. Ыт-Халбыт основной расход проходит в правой или левой протоках среди осередков в зависимости от степени развитости Лавровой протки выше по течению (рис. 3.26).

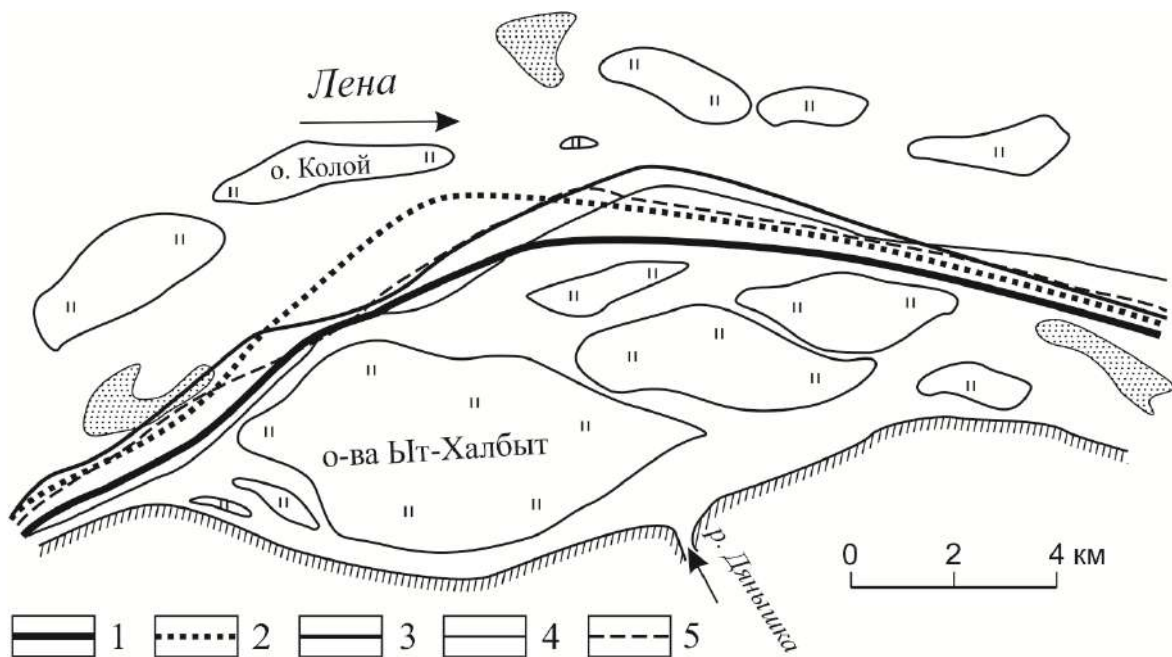


Рисунок 3.26 — Схема перекаточного участка Ыт-Халбыт (1135–1115 км) и изменение положения судового хода (без проведения дноуглубительных работ) в 1982–2020 гг. и в перспективе (план русла 2020 г.): 1 — 1982 г.; 2 — 2000 г.; 3 — 2015 г.; 4 — 2020 г.; 5 — то же в течение следующих 5–7 лет.

Деформации русла на участке Ыт-Халбыт (между звеньями Черпальским и Сахам) зависят от переформирований русла в вышерасположенном Черпальском звене и его правом рукаве. При активизации правого рукава за о. Рысьим и общем обмелении протоки Лавровой преимущественное развитие получают левые протоки на перекате Ыт-Халбыт, судоводы становятся более устойчивыми. При активизации Лавровой протоки (как это было в начале 1950-х и начале 1970-х гг.) растущие косы и отмели в устье о. Бол. Соболиного отклоняют судоводы вправо, и он, располагаясь непосредственно вдоль правого выпуклого берега вдоль о-вов Ыт-Халбыт и прибрежных за его плечом, мелет. Но здесь формируется крупный побочень, искривляющий фарватер. Цикличность таких переформирований составляет в среднем 10–12 лет. В настоящее время, как и в прогнозной оценке середины 1970-х гг., существует вероятность стабилизации судоводы в левобережной (приостровной) части рукава, где обеспечится более устойчивое его положение, в том числе вследствие дноуглубительных работ. Таким образом, регулирование русла в Черпальском узле разветвления автоматически будет сопровождаться улучшением стабилизацией участка Ыт-Халбыт. Формирование за о-вами Ыт-Халбыт скоростной тени приводит к их аккумуляции и росту отмелей и кос в устьях нижележащих островов аналогично процессу ниже устьев о-вов Тирех и Тисенгдэ, в Черпальском узле разветвления.

Разветвление Сахам, расположенное ниже Черпальского, по морфологическому строению является аналогичным ему, продолжая параллельно-рукавные разветвления и

составляя их следующее звено. Русло здесь после незначительного сужения ниже устьев о-вов Бол. Соболиный, Хара-Ары и Булун-Станаах (участок Ыт-Халбыт) снова разделяется на два основных (разделенных в центральной части архипелагов островов) и на субпараллельные им рукава, а также на многочисленные межостровные маловодные протоки посередине русла. Среди них выделяется широкий диагональный рукав между о-вами Бол. Лэпсэней и Сахам, подобный таковому у о. Бол. Соболиного в Черпальском разветвлении. Ниже захода в этот рукав слева от о. Сахам группы островов посередине реки вновь разделены субпараллельными рукавами (один из них, слева от о. Сахам, до 2015 г был судоходным). Соотношение расходов воды двух основных рукавов, как и выше по течению, — с небольшим преобладанием стока в правом основном судоходном рукаве (55–60 %). Соответственно, левый рукав в сумме с субпараллельными рукавами в центральной части русла и межостровными протоками забирает до 40–45 %. Суммарная (с островами) ширина русла достигает 13–17 км, количество островов и рукавов в одном створе — более 10. Наиболее крупными островами (или группами островов), являются Бол. Лэпсэней ($L_0=6100$ м, $B_0=1200$ м) и Хонгкуя ($L_0=4700$ м, $B_0=910$ м) в верхней части звена (выше ответвления диагонального рукава), и Сахам и Батык-Ары в нижней части с маловодной протокой (3–5%) между ними длиной более 10 км; нижнюю часть разветвления в левой стороне реки составляют безымянные острова, преимущественно меньших размеров ($L_0=1300–2500$ м, $B_0=350–800$ м (рис. 3.27). Разветвление Сахам характеризуется тем, что, по данным последних измерений расходов (2020–2021 гг.), в нем наиболее выражена разница в водности между правой и левой системами рукавов, что связано с повышенной водностью квазипоперечного рукава (рис. 20, створы № 5, 6, 14); соответственно, в отличие от квазипоперечных рукавов в Монастырском (перед о. Оймякон) и Черпальском (Лавровая протока) разветвлениях, в нем располагался судовой ход.

Несмотря на одинаковый морфодинамический тип русла, параллельно-рукавные разветвления на средней и нижней Лене отличаются друг от друга, во-первых, общей сложностью последних, в которых, помимо разветвлений русла 2-го и 3-го порядка в основных рукавах, развиты второстепенные (квазипоперечные и субпараллельные — между островами в центральной части русла) рукава, по которым осуществляется перераспределение стока и которые отличаются в этом отношении интенсивными русловыми деформациями и переформированиями островов, в то время как динамика центральных более крупных островов менее выражена.

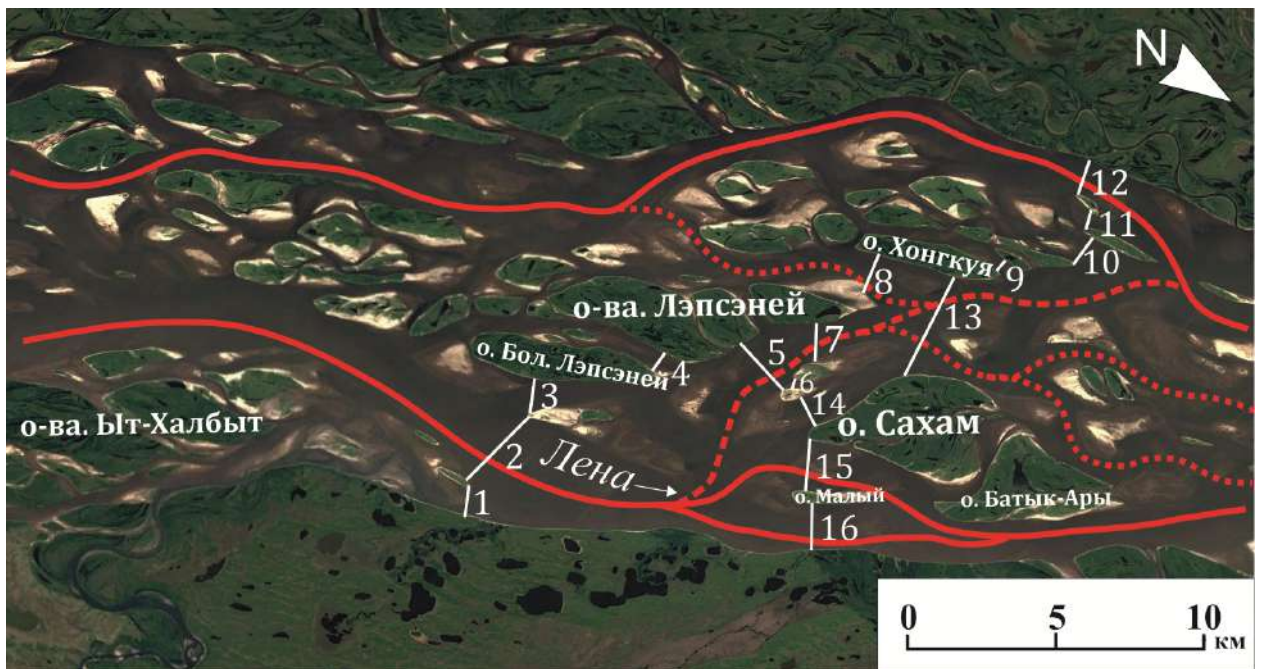


Рисунок 3.27 — Разветвление Лэпсэней-Сахам (1135–1095 км по судовому ходу) и расположение створов измерения расходов воды в июле 2021 г. Сплошными линиями показано положение стрежня потока в основных по водности рукавах, пунктирными — квазипоперечные и субпараллельные рукава.

Основным и наиболее важным фактором, определяющим морфодинамику русла, как и выше по течению, является разделение потока на два основных рукава, в каждом из которых формируются острова и осередки, в свою очередь, разделяющие их на протоки 2-го порядка. Но в отличие от Монастырского и Черпальского разветвлений водность основных рукавов здесь различается почти в 3 раза: левый рукав (створы №№ 10–12) — 17.8 %, правый (№№ 1, 2, 3) — 65.5 %. Такому перераспределению стока в пользу правого основного рукава способствует направляющее воздействие вогнутости левого берега в Черпальском звене и образование цепочки островов посередине русла, перекрывающих заход в левый рукав в разветвлении Сахам. В результате по все трем звеньям происходит последовательное увеличение водности правых и снижение водности левых рукавов. В правой ветви течения перераспределение расходов воды по рукавам разветвлений второго порядка, смещение и надвижение на заходы в рукава побочней на фоне сезонных и многолетних колебаний стока реки, как и в Черпальском разветвлении, приводят к периодическому изменению положения динамической оси потока и такой же периодичности в активизации диагонального рукава у о. Сахам.

Так же как и в вышележащем узле, линейные размеры островов на участке сильно различаются: как одиночные, так и составляющие архипелаги острова, расположенные в центральной части русла между двумя основными рукавами, характеризуются средними размерами от 3 до 6 км в длину и от 500 до 1700 м в ширину, при этом отдельные острова

(особенно составляющие центральный массив) могут достигать больших размеров, главным образом в ширину (до 2,5–3,5 км). В разветвлениях второго порядка в основных рукавах и в основном диагональном рукаве формируются элементарные острова, меньшие по длине и ширине ($L_o = 800\text{--}1200$ м, $B_o = 300\text{--}500$ м); меньшие по размеру острова и большее их количество также преобладают в левобережной части русла в меньшем по водности рукаве. В отличие от правых, более многоводных рукавов, левые рукава во всех звеньях параллельно-рукавных разветвлений характеризуются на всем протяжении вторичными разветвлениями и формированием многочисленных перекатов. Этому способствует их наносотсасывающая функция из-за поперечного перекаса водной поверхности во время половодья от правого коренного берега и сосредоточения в них вод левого притока — р. Вилуй. Это подтверждается анализом расходов взвешенных наносов по рукавам: правый рукав, не испытывающий на себе влияние притока, характеризуется расходом наносов 223 кг/с, в то время как левые рукава в сумме имеют расход взвешенных наносов 360 кг/с (при меньшей водности по сравнению с правым).

Для всей системы параллельно-рукавных разветвлений характерно относительное постоянство в многолетнем плане водности основных субпараллельных и/или диагональных рукавов, испытывающих незначительные колебания в связи с сезонными и многолетними изменениями стока и местными русловыми деформациями.

ГЛАВА 4. ОСТРОВА КАК ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ РАЗВЕТВЛЕНИЙ.

4.1. Формирование осередков и переход от осередкового структурного уровня разветвленности к русловому (островному).

4.1.1 Формирование элементарных островов и их дальнейшее развитие

Обязательным условием формирования островов, а следовательно и разветвлений, является аккумуляция наносов между динамическими осями или стрежневыми зонами потока и образование здесь осередков, которые, закрепляясь сначала пионерной, а затем кустарниковой растительностью при обсыхании в меженный (маловодный) период, превращаются в пойменные острова. Таким образом, следует различать разветвленность потока и разветвленность русла подобно различиям между извилинами динамической оси потока и излучинами русла меандрирующей реки. При наличии островов эти понятия совпадают; если острова не сформировались, то речь идет исключительно об осередковой разветвленности. Осередки возникают также при отторжении побочной от берегов или расчленении их побочными протоками, отчленением кос от ухвостьев уже существующих островов, а также при накоплении наносов возле препятствий посередине реки (например, скальных выступов на дне — огрудков). Вместе с побочными и косами осередки объединяются общим понятием — прирусловые отмели [Чалов, 2022]. Выходя из-под воды по мере спада уровней, в низкую межень, обсохшие прирусловые отмели занимают 30–40 %, а на некоторых участках верхней Оби, средней и нижней Лены — до 3/4 общей площади русла в пойменных бровках (рис. 4.1).



Рисунок 4.1 — Осередок на средней Лене (Усть-Алданский участок). Фото автора.

Таким образом, осередки — разновидность прирусловых отмелей, отделенных от берегов или расположенных посередине реки и разделяющих ее при низких уровнях на протоки. В этом отношении осередки отличаются от островов, которые представляют собой части суши на реке, покрытые растительностью, отделенные от берегов рукавами,

вызывающие рассредоточение стока во все фазы водного режима и затопляемые в половодье или высокие паводки. Соответственно изменяется терминология в отношении водотоков, формирующихся в результате разветвления русла, которые носят названия *протоки* (в случае осередковой разветвленности) и *рукава* (являются элементами русловой (островной) разветвленности) [Чалов, Чалова, Голубцов, 2021].

В зависимости от условий формирования осередков, их расположения посередине или в периферической части русла в рукавах уже существующих разветвлений выделяется несколько разновидностей осередков и связанных с островами прирусловых отмелей (рис. 4.2):

1. Элементарные (простые) осередки, представляющие собой повышенные части больших гряд-макроформ руслового рельефа, составляющие от 1/5 до 1/10 ширины русла (рис. 4.2, А). Обычно они встречаются в неустойчивом русле и входят в состав перекатов-россыпей.

2. Косы в ухвостьях островов, формирующиеся в виде стрелки вдоль границы сливающихся потоков двух рукавов, вытянутые вниз по течению и характеризующиеся понижением отметок в этом направлении (рис. 4.2, Б). Развитие таких кос обычно является признаком и следствием трансгрессивного (вниз по течению) смещения островов, в ухвостьях которых они образовались.

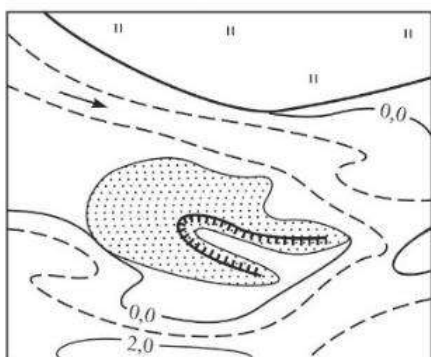
3. Побочни у оголовков островов, образующиеся там, где поток разделяется на две ветви в зоне его набегания на оголовок острова и вследствие местного снижения транспортирующей способности. Часто подвалье гряды на таких побочных оконтуривает оголовок острова, а между ним и подмываемым участком (яром) острова существует узкая и глубокая протока (рис. 4.2, В). Такие побочни (осередки) обуславливают регрессивное смещение островов (вверх по течению).

4. Отрезанные косы (по Н. И. Маккавееву [1955]), представляющие собой осередки, образовавшиеся вследствие возникновения проток по линии наибольшего уклона, вдоль ухвостья острова или расчленяющих косу на части (рис. 4.2, Г). Возникающие в таких случаях осередки иногда достаточно быстро размываются по мере смещения сохранившейся части косы в ухвостье острова или развития новой протоки, вызвавшей расчленение косы. Как правило, это приводит к стабилизации ухвостья острова и прекращению его трансгрессивного смещения.

5. Большие (сложные) осередки, соизмеримые с шириной русла b_r или рукава $b_{рук}$, в котором они сформировались. Такие осередки разделяют меженное русло на равноценные по водности протоки, создавая осередковую разветвленность, чаще всего являющуюся (при зарастании) основой формирования элементарных островов как

будущего элемента одиночных, сопряженных, параллельно-рукавных разветвлений. Нередко такие осередки состоят из нескольких надвинувшихся друг на друга и объединившихся элементарных простых осередков (рис. 4.2, Д). [Чалов, Жмыхова, 2014; Голубцов, Чалов, 2020; Чалов, 2022]. Помимо вышеперечисленных на реках с разветвленным руслом встречаются также отторженные от берегов побочни; в этом случае протоки вдоль берега или расчленяющие сами побочни называются побочневыми. Побочни, примыкающие к островам в рукавах ниже их оголовков, вызывают поперечный рост островов — при больших размерах они иногда могут переходить в косу в ухвостье острова. В таком случае вдоль острова также возможно развитие побочневой протоки.

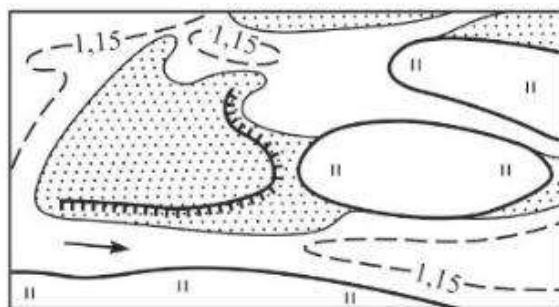
А



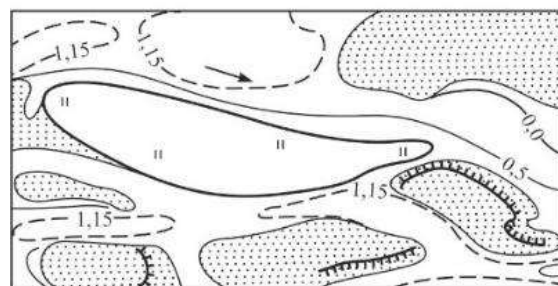
Б



В



Г



Д

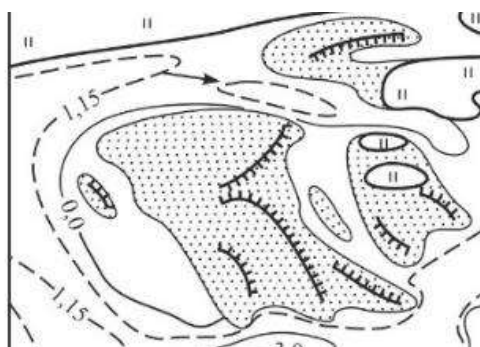




Рисунок 4.2 — Морфологические типы приустьевых отмелей, формирующих осередковые разветвления: А — элементарные (простые) осередки; Б — косы в ухвостьях островов; В — побочни у оголовков островов; Г — отрезанные косы; Д — большие (сложные) осередки.
1 — пойма, 2 — приустьевые отмели, 3 — подвалы гряд-макроформ [Чалов, Жмыхова, 2014].

Осередки, в том числе отделенные от берегов маловодными протоками побочни, обсыхая в межень, оказывают влияние на поток, возрастающее по мере понижения уровней, и осложняются вновь формирующимися скоплениями наносов в их ухвостьях. Иногда они подвергаются частичному боковому размыву, и возникающие при этом уступы называют «обрезными песками», высота которых на больших реках может достигать 3–4 м (средняя Лена) (рис. 4.3).



Рисунок 4.3 — «Обрезные пески» на средней Лене, Приалданский участок. Фото автора.

Все это приводит к изменению очертаний и размеров осередков. На поверхности осередков (пока они находятся под действием потока) происходит трансформация форм микро- и мезорельефа, связанного с грядовым движением наносов.

В продольном профиле простая отмель (побочень, осередок) представляет собой гряду с длинным пологим верховым (напорным) склоном, плоской субгоризонтальной пригребневой частью, обрывающейся вниз по течению крутым подвалом с углом естественного откоса $\sim 30^\circ$ (рис. 4.4, А). Если эта отмель прибрежная,

то на значительном протяжении подвалье вытянуто субпараллельно берегу, между ним и берегом обычно располагается ложбина, частично заполненная преимущественно тонкими наносами, образующая залив с нижней стороны побочня — заводь (затонину) переката (рис. 4.4, Б). С речной стороны побочня или с обеих сторон осередка (рис. 4.4, В) подвалье постепенно уходит под воду [Чалов, Кирик, 2015].

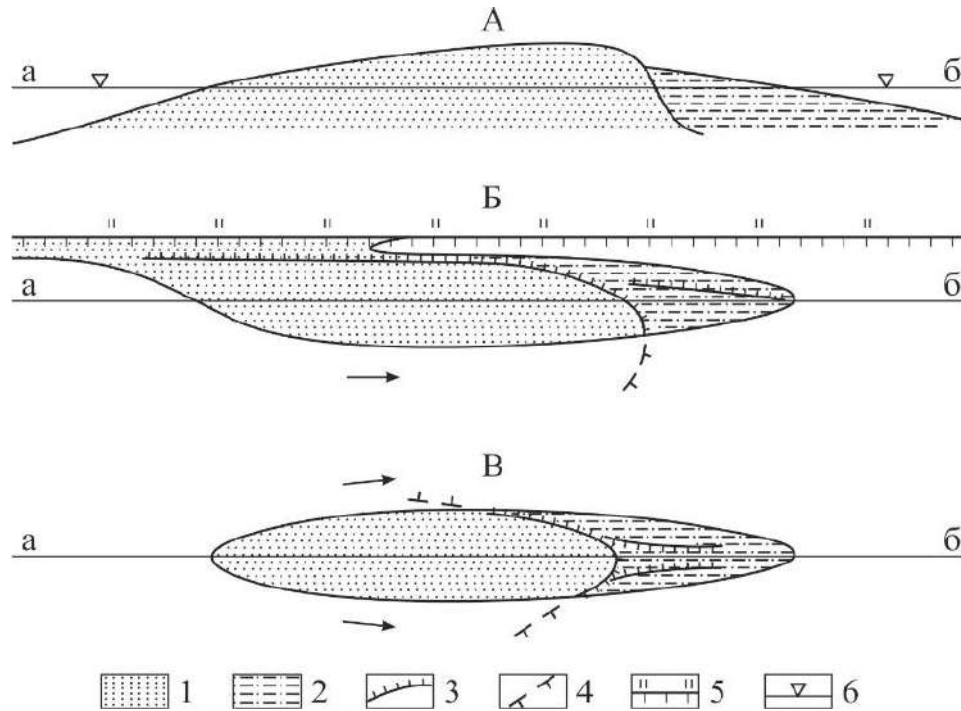


Рисунок 4.4 — Продольный профиль (А) и планы морфологически простых прирусловых отмелей — побочней (Б) и осередка (В). 1 — песчаные отложения, слагающие побочень (осередок); 2 — песчано-илистые отложения в ухвостье; 3 — подвалья гряд и кос; 4 — подводное продолжение подвальев; 5 — пойма; 6 — меженный уровень воды; а-б — линия профиля [Чалов, Кирик, 2015].

Высота прирусловых отмелей над меженным уровнем воды зависит от кривизны русла (или рукавов, в которых они образуются), степени развитости изгиба потока возле отмелей и величины стока влекомых наносов (чем они меньше при прочих равных условиях, тем ниже отметки отмелей — вплоть до их подводного положения даже в низкую межень). Относительная максимальная высота отмелей (в основном осередков) на Лене достигает 5–7 м над меженным урезом воды в реке, оказываясь лишь немного ниже средней высоты поймы; на верхней Оби она несколько меньше — до 3,5–4,5 м. В низовьях пойменных массивов высота отмелей может даже превышать таковую у поймы. При такой ситуации наиболее высокие части отмелей в низкие половодья (или паводки) затапливаются на очень короткое время и на небольшую глубину. Продолжительность затопления отмелей высотой до 2 м обычно не более 80–90 суток. За остальное время на них может поселиться пионерная растительность, однако никак не закрепляющая

поверхность и не защищающая ее от воздействия потока при последующем более сильном затоплении. Ее появлению препятствует подвижность слагающих отмель наносов, поэтому она нередко возникает в ухвостях отмелей, где происходит накопление самых тонких (в т.ч. илистых) отложений в зоне низких скоростей течения. Однако в последующее половодье основная гряда, образующая осередок, смещаясь, надвигается на эти образования в ухвосте и погребает их под собой. В случае, когда наиболее высокие пригребневые части осередков оказываются в субэральных условиях большую часть вегетационного периода и постепенно покрываются кустарниковой растительностью, мощная корневая система которой выдерживает затопление, препятствует размыву в субаквальных и дефляции в субэральных условиях, способствует снижению скоростей потока и еще бóльшей аккумуляции преимущественно илистых наносов [Сурков, 1999].

Появление растительности — необходимое условие превращения осередка в элементарный остров и деления потока на ветви течения даже в половодье. Но для образования очагов зарастания, особенно древесно-кустарниковой растительности, необходим ряд условий. Так, например, закрепление побегов ивы происходит за 3–5 маловодных лет, когда повышенные части осередков не затапливаются [Бокк, 1990]. Поэтому именно возникновение устойчивых очагов зарастания именно древесно-кустарниковой растительностью — ключевой, наиболее длительный и сложный этап превращения осередка в остров, который занимает при благоприятных условиях от 10 до 30 лет [Сурков, 1998, 1999]. Растянутое половодье (а также частые и высокие летне-осенние паводки приводят к тому, что осередки выходят из-под воды глубокой осенней меженью, когда вегетационный сезон на исходе. Большие незадернованные отмели на реках с летними паводками, в частности, на нижней Лене (ниже устья Вилюя), расположенной в субарктических широтах, и появление большой доли незарастающих осередков — это следствие очень короткого вегетационного периода.

Укоренившаяся растительность на осередке способствует аккумуляции тонких (взвешенных) наносов, обычно с органическими остатками, являющимися благоприятным субстратом для дальнейшего развития растительности. Зарастающий осередок быстро растет в высоту, увеличивается в размерах и превращается в элементарный пойменный остров. Темп осадконакопления на реках с большой мутностью потока достигает 20–50 см в год. На верхней Оби (среднегодовая мутность потока 140 г/м^3) осередки превращаются в острова через 7–20 лет в зависимости от местных особенностей русла и мощности половодий, за 20–40 лет длина молодых островов достигает нескольких сот метров при высоте 3–3,5 м над меженным уровнем [Сурков, 1997, 1999]. На средне и нижней Лене

этот процесс более продолжительный вследствие бóльших размеров осередков, скорости потока, климатических условий, а также меньшей мутности потока.

Таким образом, зарастание осередков и превращение их в молодые элементарные острова, обуславливающие разделение потока на ветви течения даже при полном их затоплении (вплоть до экстремально высоких уровней подъема воды), определяется их относительной высотой над меженным уровнем воды и наличием растительности, особенно древесной и кустарниковой, обеспечивающей на порядки большую шероховатость подстилающей поверхности реки над островом, и является первым и основным этапом их формирования и ключевым этапом в переходе от осередкового к русловому (островному) структурному уровню разветвлений.

Речные острова отличаются многообразием своих форм, условиями образования и последующими с момента образования стадиями развития, а также морфометрическими параметрами и положением в русле, а иногда своим генезисом. Объединение островов в процессе переформирования русла (при занесении наносами, заполнении их отмелями, зарастании последних и отмирании самих протоков) приводит к увеличению их размеров и формированию островных массивов, имеющих сложную конфигурацию и обуславливающих значительную удаленность рукавов друг от друга (до нескольких десятков раз превышающую их ширину, особенно в крупных пойменно-русловых разветвлениях и в раздвоенном русле) или расчленение поймы на отдельные пойменные массивы пойменными протоками (формирование пойменной многорукавности). Последняя — следствие сохранения отшнуровавшихся от русла протоков, концентрирующих при затоплении поймы возникающие на ней потоки.

Наличие на реке островов и их взаиморасположение определяют морфодинамический тип разветвленного русла или морфологическое осложнение излучин, прямолинейных участков и рукавов разветвлениями 2–3-го порядков, вызывая из-за рассредоточения стока изменение их параметров.

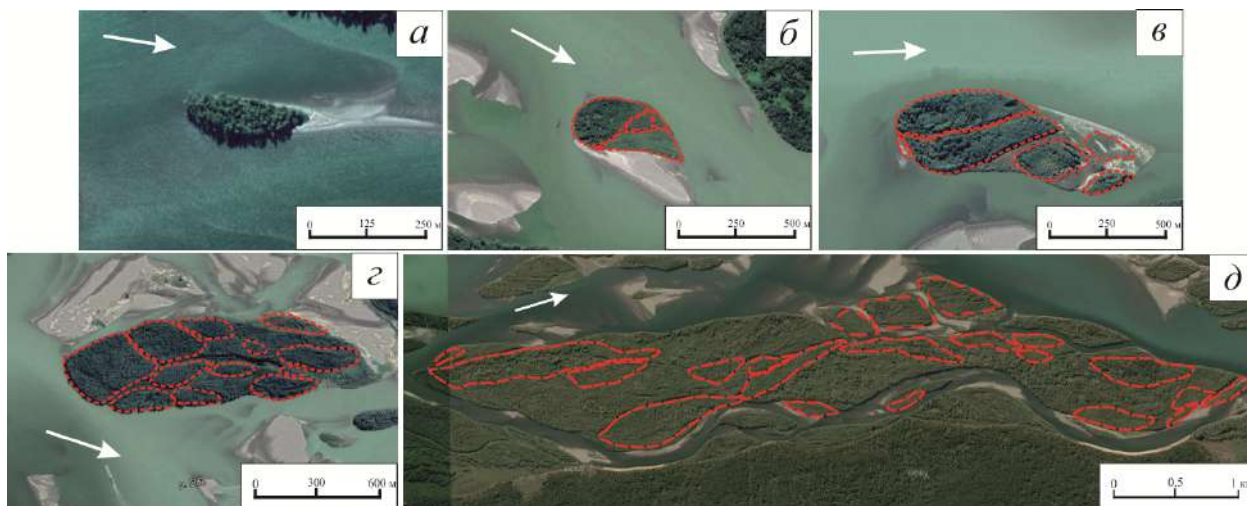
При всем морфологическом многообразии островов выделяются следующие основные их типы: **элементарные острова** (рис. 4.5, Аа, Ба), формирующиеся при зарастании осередков, сохраняющие их форму и размеры (на верхней Оби их длина и ширина от нескольких десятков до сотен метров, на средней Лене — до 1–2 км при ширине русла, соответственно, до 2,5 и 5–7 км, на нижней Лене они достигают длины 3–4 км, при суммарной ширине русла до 12–18 км); **малые острова** (рис. 4.5, Аб, Бб), возникающие при объединении 2–3-х элементарных; преобладающие их размеры на больших реках — сотни метров (реже — первые километры) в длину и 200–300 м в ширину при средней суммарной ширине русла вместе с островами — 3–5 км, однако при

увеличении ширины русла и водности реки их длина может достигать 4–5 км; *средние острова* (рис. 4.5, Ав, Бв), образующиеся несколькими объединившимися малыми и элементарными, а также вследствие причленения к ним побочной со стороны рукавов и к оголовкам и кос в ухвостьях при частичном, обычно с оголовков, их размыве; размеры этих островов сопоставимы с размерами русла, имея на больших реках — верхней Оби и средней Лене — 3–7 км в длину и 1–1,5, реже 2 км в ширину при суммарной ширине русла соответственно 3–4 и 7–8 км; *большие острова* (рис. 4.5, Аз, Бз), представляющие собой несколько объединившихся малых и средних при обсыхании и зарастании разделяющих их проток; это наиболее крупные формы в русловых разветвлениях, квазистабильные, неправильной формы, подверженные лишь частичным переформированиям в течение многих десятилетий и даже столетий. Как правило, они располагаются вне зоны активных русловых деформаций, но иногда встречаются посередине реки, образуя одиночные, отдельные звенья сопряженных и параллельно-рукавных разветвлений (последние — на крупнейших реках со слабоустойчивым или неустойчивым руслом, например на нижней Лене ниже устья Вилюя или во врезанном устойчивом русле, как на средней Лене или на Ангаре [Чалов, С. Чалов, 2009]). В ширину они достигают на средней Лене 3–5 км при длине до 10–12 км, являясь предельными параметрами для этого типа разветвлений [Чалов, Голубцов, 2019].

В процессе своего развития (постепенного причленения и зарастания побочной) развития кос в ухвостьях и объединения за счет отмирания протоков острова приобретают все большие размеры, иногда сохраняя соотношение длины и ширины $L_0/B_0 \approx 3-4$, соответствующее минимуму гидравлических сопротивлений, обеспечивающие наименьшие сопротивления потоку, статистически полученному еще в XX веке [Комар, 1983; Baker, 1977]. По мере укрупнения острова такая форма выдерживается, если разветвление симметрично (водность рукавов сопоставима), а литологический состав слагающих его отложений однороден. Со временем при последующем объединении островов они образуют *островные массивы* (рис. 4.5, Ад, Бд) сложной конфигурации и с размерами, превосходящими ширину русла (длина и ширина таких массивов может достигать 15–20 и более км), создавая при этом уже более высокие уровни разветвленности, при которых рукава реки характеризуются своими типами русла, образуя несколько смежных форм — излучин, разветвлений, прямолинейных отрезков или (в раздвоенном русле) свои морфологически однородные участки [Чалов, Куракова, 2022]. На разветвленных участках русла крупнейших рек (Оби, Лены, нижней Волги) островные массивы являются конечной стадией развития островов, образуя сложные пойменно-русловые разветвления, а на средней и нижней Оби, Амуре [Борщенко, Чалов,

2014] — раздвоенное русло с обширными *пойменными массивами* между их рукавами — межкуавьями [Смирнова, 2002], в свою очередь расчлененными на части пойменными протоками (на нижней Оби такие межкуавья получили свое название — Межобье), разделяя на расстоянии в сотни километров левый рукав — Малую Обь — и правый — Горную и Большую Обь [Чалов, Завадский и др., 2021].

А



Б

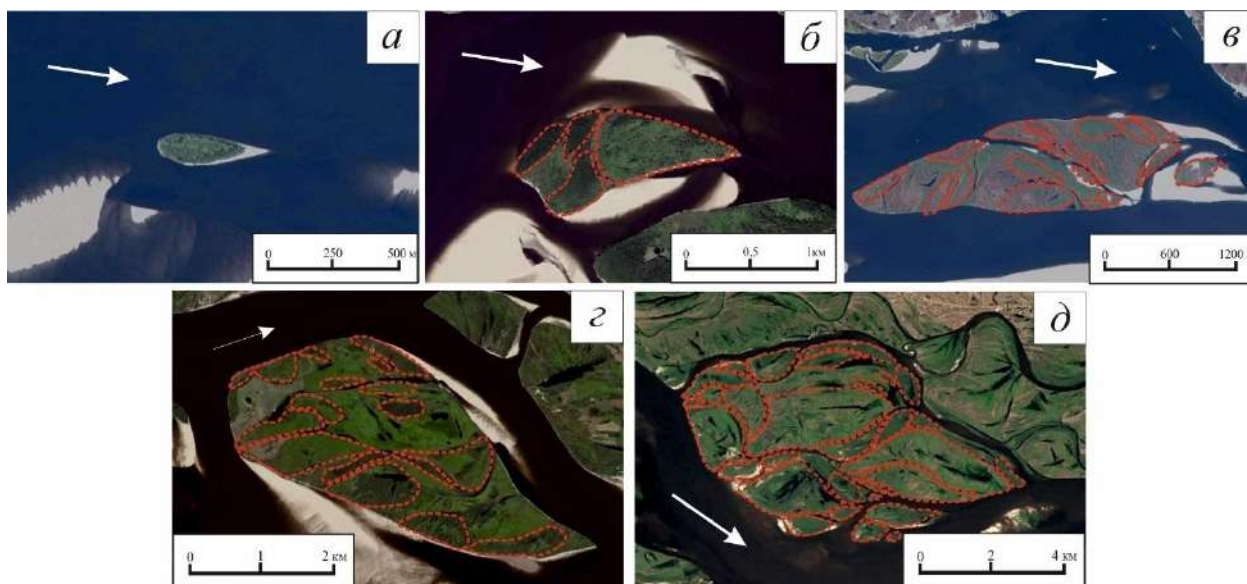


Рисунок 4.5 — Острова разных типов на верхней Оби (А) средней Лене (Б) А: а — элементарный остров, Акутихинские разветвления; б — малый остров, Талицкое разветвление; в — средний остров, ниже п. Быстрый Исток; г — большой остров, Солдатовское разветвление; д — островной массив напротив устья р. Ануй. Б: а — элементарный остров, Якутский «разбой»; б — малый остров, «разбой» Рассолода; в — средний остров (о. Пономарев в Якутском «разбое»); г — большой остров, Жатайско-Кангаласские разветвления; д — островной массив ниже мыса Кангаласский камень.

Пунктирная линия красного цвета показывает границы элементарных малых островов, составляющих более крупные острова.

4.1.2. Особенности развития островов и их влияние на русловые переформирования.

Сформировавшиеся элементарные острова под воздействием на них речного потока, размывов и аккумуляции возле них наносов смещаются, изменяют форму, увеличиваются в размерах благодаря причленению к ним побочней и развитию кос в ухвостях (или отмелей у оголовка), объединению с другими островами, превращаясь в течение длительного времени (десятки и первые сотни лет) в большие по размерам острова или островные массивы, соответствующие более высоким уровням развития разветвленности.

Это связано с возникающей возле каждого острова определенной кинематической структурой потока. В нижней части острова донные струи направлены от берегов к ухвостью, вследствие чего здесь формируется коса, тогда как противоположные ему берега размываются. Наоборот, у оголовка острова возникает подпор потока и зона ускорения течения, донные струи направляются в сторону от него, вследствие чего он размывается. Причины образования зон ускорения и замедления течения те же, что и на излучине русла. Главная роль в этом процессе принадлежит циркуляционным течениям, возникающим у оголовка острова, и связанным с ним поперечными уклонами, направленными от острова в сторону каждого из берегов в створе узла разветвления, при этом в зонах замедления течения происходит аккумуляция наносов. В нижней части разветвления, в узле слияния рукавов, наоборот, остров наращивается. Таким образом, структура потока, формирующаяся возле образующегося острова обуславливает его трансгрессивное смещение, он размывается с оголовка, и, наоборот, наращивается в ухвосте, сохраняя в целом оптимальную (каплевидную) форму [Чалов, Кирик, 2015].

Набегание потока (прижимное течение) на оголовки острова, может приводить к очень высоким темпам размыва, достигающим на отдельных больших реках значений 50-60 м/год, а размываемый уступ приобретает вид вертикальной стенки [Куракова, Чалов, 2019].

Наряду с трансгрессивным смещением островов во многих случаях проявляется и регрессивная форма их смещения как следствие образования и роста отмелей у их оголовков, приводящего к удлинению островов и изменению их формы (как правило, острова приобретают вытянутую, веретенообразную форму). Однако даже рост отмели у оголовка острова не исключает возможного его размыва. Он происходит из-за течений в поперечной протоке между островом и отмелью перед ним в случае, если перепад уровней между рукавами у острова весьма значительный, а скорости потока в ней – достаточно

большие. Кроме того, в период высоких уровней, когда незакрепленная растительностью отмель оказывается полностью затоплена, возникают те же процессы у оголовка, связанные с циркуляционным течением и приводящие к его размыву.

Одновременно ниже оголовка в рукавах, огибающих остров, возникают условия для образования зоны аккумуляции наносов (подобно таковой на излучине русла, которую, собственно говоря, образует рукав) и, соответственно, условия для формирования здесь побочня, примыкающего к острову. Это способствует в условиях увеличения ширины острова (при зарастании побочня и превращении его в пойму) дальнейшей дифференциации скоростного поля потока возле острова, активизации его расширения и трансгрессивного удлинения, и, с другой стороны, сохранению островом оптимальных соотношений его параметров. При наличии двух островов процессы их поперечного развития из-за формирования возле каждого из них побочней приводят к заполнению межостровной протоки (рукава) отмелями, и при их зарастании – к объединению элементарных островов и превращению их в малые, средние и большие, что является граничным условием перехода от одного типа к другому в их эволюционном ряду.

Размывы берегов реки, противоположных острову или группе островов посередине русла приводит к их общему расширению, причем ширина реки выше острова оказывается меньше суммарной ширины обоих рукавов. Наряду с рассредоточением потока по образующимся рукавам это, в свою очередь, является причиной относительной стабилизации острова или группы островов и связанного с ними разветвления русла.

Если остров в минимальной степени способствует изгибу потока, и местного расширения русла не наблюдается, ($B_o < 0,4b_p$), то разветвление квалифицируется как имеющее 2-й или (в зависимости от B_o) 3-й порядок [Чалов, Алабян и др., 1998]. Но местные расширения русла могут иметь и иное происхождение, и тогда растекание по нему потока служит причиной формирования острова. Таким образом, соответствие разветвления местному расширению русла, вне зависимости от его генезиса, – важное условие развития одиночных разветвлений. Однако иногда встречаются узкие и очень длинные острова, вытянутые почти посередине русла параллельно берегам реки, не вызывающие отклонения к ним потока, вследствие чего размыв их не происходит. Подобные острова, у которых $L_o/B_o > 10-12$, имеются на Сухоне, Мезени, Печоре, Оби, как правило, в виде единичных форм. Несмотря на то, что $B_o \sim 0,05-0,1 b_p$, из-за их большой длины и равнозначного распределения стока между рукавами, такие разветвления следует относить к основным (первого порядка) разветвлениям русла [Чалов, Львовская и др., 2015].

В процессе развития островов и в соответствии с условиями их формирования устанавливаются устойчивые зависимости основных параметров (длины L_o , ширины B_o , формы в плане L_o/B_o), типа и количества островов от показателей устойчивости – числа Лохтина L и коэффициента стабильности Н.И. Маккавеева K_c , размеров реки (ее водности), морфодинамического типа и положения в русле (в активной или периферической части). Полученные связи показывают, что зависимость формы островов L_o/B_o и степени разветвленности – n_o/x от устойчивости русла характерна для всех типов разветвлений, стадий развития и соответствующих им типам самих островов (элементарным, малым, средним, большим и островным массивам). Каждая последующая стадия развития острова сопровождается его ростом и укрупнением, причем линейные размеры островов и их форма в плане зависят главным образом от морфодинамического типа русла и его устойчивости [Чалов, Голубцов, 2019]. Наименее устойчивым руслам с параллельно-рукавными разветвлениями свойственно преобладание элементарных и малых островов; в более устойчивых руслах этого и других типов происходит их объединение в большие острова, а в зонах постоянной местной аккумуляции наносов в периферических частях русла – в островные массивы и их последующее причленение к береговой пойме с образованием второстепенных пойменных протоков (ответвлений). Степень устойчивости русла определяет форму островов, выраженную соотношением их длины и ширины (L_o/B_o). Оптимальным соотношением является статистически достоверная величина [Комар, 1983; Baker, 1977] $L_o/B_o \approx 3-4$, при котором острова имеют форму, близкую к каплевидной. При снижении устойчивости русла формируются удлиненные веретенообразные острова ($L_o/B_o > 5$, на нижней Лене $L_o/B_o > 6,5$).

Дополнительным фактором формирования островов оптимальной формы является интенсивный размыв их оголовков и одновременная аккумуляция наносов в виде кос в их ухвостьях, вследствие чего увеличивается длина острова, а его максимальная ширина наоборот сокращается. Повышение устойчивости при всех типах русла в условиях одинаковой водности приводит к формированию больших, изометричных в плане островов, тяготеющих к периферийной части русла или формирующих относительно устойчивые односторонние разветвления (таков достаточно протяженный участок средней Лены выше Кангаласского Камня).

4.2 Морфометрические характеристики островов, их связь с устойчивостью русел и их морфодинамическим типом (гидролого-морфологический анализ).

4.2.1. Особенности применения гидролого-морфологического анализа к разветвленным руслам.

Связи параметров русла с характеристиками, отражающими его условия формирования, принято считать гидролого-морфологическими зависимостями [Михайлов, Алексеевский и др., 1990; Львовская, 2016]. Обычно они применяются для характеристики меандрирующих русел: радиус кривизны r , шаг L , и другие параметры излучин имеют устойчивые связи с показателями водности реки, более устойчивые для широкопойменных, менее – для врезанных русел [Чалов и др., 1998]. Морфологическая сложность разветвленных русел, их большое разнообразие, смена морфодинамических типов разветвлений обуславливает большой набор используемых в анализе факторных показателей, сильно изменяющихся по длине реки в зависимости от увеличения водности реки и изменения стока наносов, рассредоточения стока в разветвлениях, различной роли рукавов в распределении стока наносов в пределах даже одного и того же типа русла под влиянием местных геолого-геоморфологических условий. Таким образом, гидролого-морфологические зависимости и связи между характеристиками потока и показателями формы русла для разветвлений разного типа отличаются от таковых для меандрирующих русел, параметры которых (радиус кривизны, шаг и др.) зависят от водности реки [Иванов, 1989]. В случае с разветвлениями, получение таких зависимостей осложняется рассредоточением потока по рукавам, неодинаковым как в многолетнем плане, так и в разные фазы водного режима. Поэтому обычно они ограничиваются оценкой ширины русла в рукавах как функции их водности $b_{рук} = f(Q_{\phi})$ [Чалов, 2011]. Устойчивость русла – важный параметр, определяющий не только интенсивность русловых деформаций, но и морфологическую сложность разветвлений также при неизменности морфодинамического типа самих разветвлений. От устойчивости русла (числа Лохтина L и коэффициента стабильности русла Н.И. Маккавеева K_c) зависят морфометрические параметры островов (длина и ширина) и степень разветвленности n_0/x – количество островов n_0 на единицу длины русла x).

Вместе с тем рукава разветвлений, огибая даже элементарные и малые острова, образуют единичные излучины со всеми присущими им особенностями структуры потока. В разветвлениях, связанных с островными массивами – пойменно-русловыми и раздвоенными руслами, рукава активно меандрируют, формируя серии излучин или, в свою очередь, разветвления, соответствующие их водности. Меандрирование, таким образом, является универсальным процессом, свойственным любому типу русла [Чалов, 2021]. Поэтому при гидролого-морфологическом анализе разветвленных русел для характеристик рукавов и проток применяются те же параметры излучин, что и для

меандрирующих русел, но гидрологические показатели – соответствующие водности рукавов, т.е. с учетом рассредоточения стока.

Характеристики островов: их длина L_o , ширина B_o и форма L_o/B_o , зависят от морфодинамического типа разветвления; при этом наблюдается тенденция к увеличению соотношения L_o/B_o по мере уменьшения устойчивости русла. В пойменно-русловых разветвлениях острова имеют, как правило, изометричную сложную форму, представляя собой островные массивы. Сложность формы определяется типом русла рукавов, приобретая наиболее причудливые очертания при меандрировании обоих рукавов. Установленные соотношения между L_o и B_o обнаруживают некоторые граничные условия, при которых дальнейшее изменения формы не происходит. Единые зависимости параметров островов от устойчивости русел для разных рек, несмотря на масштабные их искажения, могут быть получены благодаря учету связи ширины русла b_p с его водностью Q , с введением поправочного коэффициента на размер реки. Благодаря гидролого-морфологическим зависимостям можно выявить условия формирования островов удлиненной формы ($L_o/B_o \gg 4$) или, наоборот, более изометричной $L_o/B_o < 3$, не соответствующих гидравлически оптимальному соотношению $L_o/B_o = 3 \div 4$ [Baker, 1977; Комар, 1983; Тарбеева, 2004; Чалов, 2011], уточнять классификацию островов и прогнозировать тенденции развития связанных с ними рукавов, с учетом их параметров.

4.2.2. Гидролого-морфологические зависимости.

На *верхней Оби* от слияния Бии и Катунь до устья Чарыша при последовательной смене типов разветвлений изменяются морфометрические характеристики создающих их островов – длины L_o и ширины B_o в соответствии с увеличением устойчивости русла (L и K_c) (табл. 4.1). Одновременно вниз по течению упрощается морфология разветвлений: сокращается количество рукавов, поток все более концентрируется в одном наиболее многоводном рукаве и, как следствие, уменьшается степень разветвленности русла n_o/x (рис. 4.6, А). На участках с параллельно-рукавными разветвлениями она составляет в среднем $n_o/x > 4$ при максимальном значении $n_o/x = 6,6$, постепенно понижаясь вниз по течению до $n_o/x = 3$. Непосредственно перед слиянием с р. Чарышом более 80 % общего расхода воды сосредотачивается в одном из рукавов, степень разветвленности сокращается до $n_o/x < 1$. Таким образом, количество островов уменьшается по мере удаления от узла слияния Бии и Катунь.

Линейные размеры отдельных островов в параллельно-рукавных разветвлениях верхней Оби не превышают первых сотен метров (средняя длина – 450 м, ширина – 120 м). В основном это – элементарные и малые острова. Однако острова, расположенные в

периферических частях русла (вдоль правого берега напротив устья р. Ануя и у левого берега выше п. Быстрого Истока), имеют гораздо бóльшие размеры и даже при малой устойчивости русла достигают нескольких километров в длину и сотен метров в ширину. Эти острова находятся вне зоны активных русловых переформирований, отделяют от реки маловодные протоки (менее 5 % от общего расхода воды в реке). 100–120 лет назад они были основными рукавами, превратившиеся в процессе развития русла во второстепенные прибрежные протоки, утратившие свою роль в рассредоточении стока и не оказывающие заметного влияния на русловые деформации.

Таблица 4.1 — Типы разветвлений русла, параметры русла и островов, показатели устойчивости русла верхней Оби [Голубцов, Чалов, 2020].

Тип разветвлений (км от слияния)	b_p , м	Устойчивость русла		Степень разветвленности русла, n_o/x	Параметры островов		
		K_c	Л		L_o , м	B_o , м	L_o/B_o
Устьевое (дельта Катунь), 0 – 5	2400	3,5	3	2,7	200-2100	60-560	4,25-4,3
Параллельно- рукавные, 5 – 47	3500	2,9	2,5	1,2-6,6	110-1900	35-500	3,75-5,1
Чередующиеся односторонние, 47-75	2700	4,5	3,6	0,5-2,7	400-2300	90-780	2,9-4,4
Односторонние (двусторонние), 76-97	800	4,6	3,9	1,0-1,3	170-3600	60-950	2,4-3,7
Устьевое (дельта Чарыша), 98-105	2200	5,5	4,1	0,7-0,9	250-2000	60-450	4,1-4,4

На *средней Лене* «разбои» (местное название сложноразветвленного русла) отличаются от разветвлений верхней Оби прежде всего своими размерами. Даже элементарные острова на средней Лене по длине и ширине сопоставимы с большими островами на верхней Оби, достигая в длину 6-8 км при ширине 1,5-3 км (табл. 4.2). При этом зависимость степени разветвленности русла n_o/x на Лене (рис. 4.6,Б) аналогична таковой на Оби: наименее устойчивому параллельно-рукавному руслу свойственна наибольшая разветвленность ($n_o/x = 3-4$), на участках с чередующимися односторонними разветвлениями при $K_c > 10-11$ она минимальна ($n_o/x \leq 1$). Это обусловлено бóльшими размерами средней Лены по отношению к верхней Оби (по средней водности – в 6,15 раза, по ширине русла – в 2,5 раза) в соответствии с пропорциональной связью ширины русла и его водности – $b_p = f(Q)$. Соответственно, показатель устойчивости русла Н.И. Маккавеева $K_c = d_{cp}/Ib_p$, включая в

себя ширину русла b_p , также зависит от размеров реки. Если принять, что для нормальной (каплевидной) формы островов характерно соотношение $B_o = 0,4b_p$, где b_p – ширина русла или рукава перед узлом разветвления (по В.В. Иванову [1989]), и ввести поправочный коэффициент на размер реки $\alpha = 2,5$ (разница в ширине русла сравниваемых рек) в показатель устойчивости, то увеличивая на него K_c для верхней Оби и приводя обе реки к единой шкале значений, с учетом введенных поправок получаем единую зависимость (рис. 4.6,В) [Голубцов, Чалов, 2020].

Таблица 4.2 — Типы разветвлений русла, параметры русла и островов, показатели устойчивости русла (средняя Лена) [Голубцов, Чалов, 2020].

Тип разветвлений (км от устья)	b_p , м	Устойчивость русла		Степень разветвленности русла, n_o/x	Параметры островов		
		K_c	Л		L_o , м	B_o , м	L_o/B_o
Односторонние, 1745-1725	6500	7,1 -9,2	6,2-8,0	0,9-2,0	410-3200	110-600	3,7-5,9
Сложное одиночное (трехрукавное) - Покровский «разбой», 1725-1710	8000	7,0	6,4	1,5-2,2	650-3600	750- 1400	4,5- 5,5
Параллельно- рукавное – «разбой» Рассолода, 1710-1680	8500	4,1-6,1	3,8-5,5	2,8-4,6	300-2100	95-420	2,1-4,8
Параллельно- рукавное – Якутский «разбой», 1670-1630	10500	4,0-5,5	3,7-4,2	2,5-4,0	200-4900	50-1250	2,0-4,9
Чередующиеся односторонние, 1630-1598	7000	9,5-11,5	8,0-9,0	0,3-1,0	2600- 5500	800- 2000	2,5-3,2

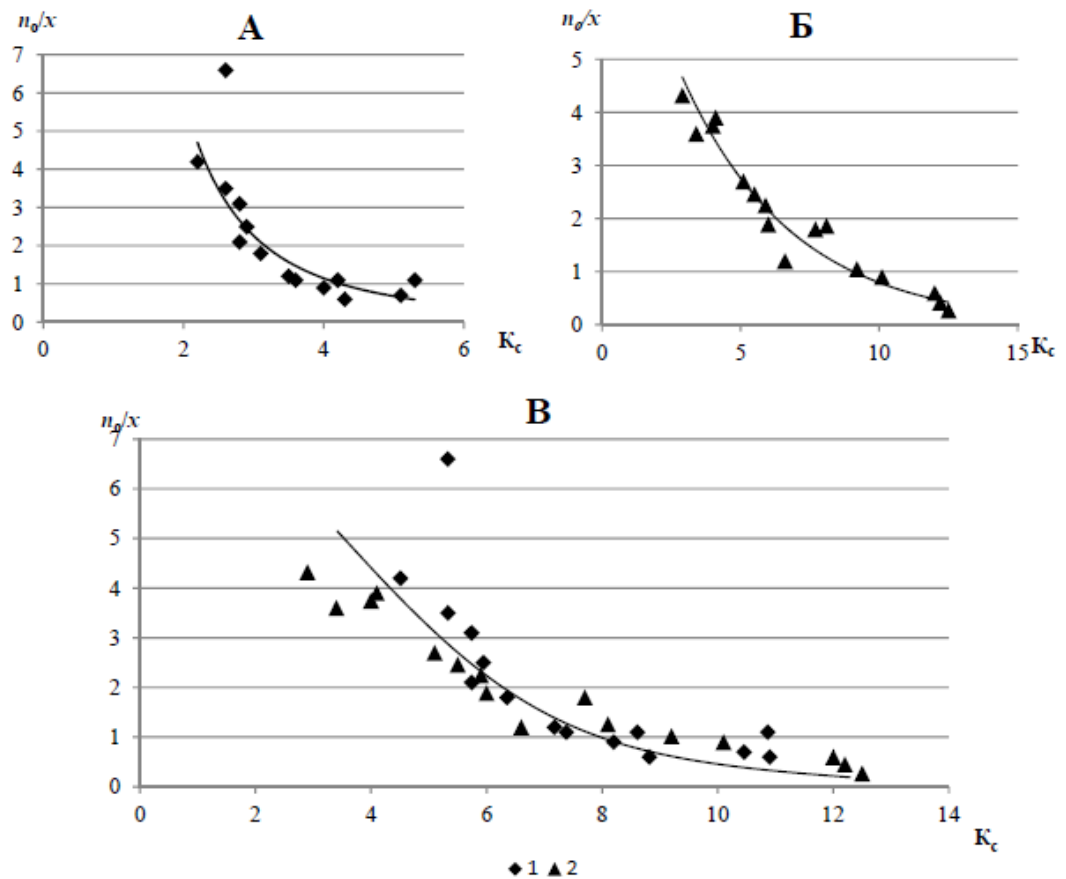


Рисунок 4.6 — Зависимость степени разветвленности русла n_o/x от его устойчивости (K_c): А – верхняя Обь, Б – средняя Лена, В – объединенный график с учетом поправочного коэффициента α на размер рек (1 – верхняя Обь, αK_c ; 2 – средняя Лена, K_c) [Голубцов, Чалов, 2020].

Помимо линейных размеров островов, важным безразмерным морфометрическим параметром островов является соотношение их длины L_o и ширины B_o – коэффициент формы L_o/B_o , величина которого также зависит от устойчивости русла. Наиболее изометричные в плане острова сложной формы (обычно это – большие острова или островные массивы, сформировавшиеся вследствие объединения нескольких элементарных островов) присущи участкам русла с большими значениями показателей устойчивости. Размеры таких островов и тем более островных массивов больше, чем сумма объединившихся элементарных из-за включения в них превратившихся в ложбины на пойме бывших протоков и рукавов между этими островами, причленившихся к ним, покрывшихся растительностью побочней и кос в ухвостьях, превратившихся в участки поймы. На Оби такие острова встречаются (не считая периферических зон русла) ниже 50 км от слияния Бии и Катунь (п. Быстрого Истока), где в русле в последние десятилетия произошла частичная трансформация чередующихся односторонних разветвлений в параллельно-рукавные. В то же время простая (каплевидная, веретенообразная) форма чаще всего характеризует элементарные, малые и лишь отдельные большие острова в

параллельно-рукавном русле. Острова изометричной формы, сосредотачиваясь преимущественно в периферической части русла, находятся в зонах замедления течения и местной аккумуляции наносов, вследствие чего активизируется объединение островов при обмелении протоков, они утрачивают гидравлически оптимальное соотношение $L_o/B_o = 3 \div 4$, приобретая в русле с параллельно-рукавными разветвлениями удлиненную, вытянутую вдоль реки сложную форму, а в русле с чередующимися односторонними – также и избыточно большую ширину B_o .

Линейные размеры островов зависят, как и степень разветвленности русла n_o/x , от его устойчивости и типа разветвлений (рис. 4.7). На графиках они дифференцируются по типам русла. Наименьшие размеры имеют острова в параллельно-рукавном русле: соответствующие им точки для обеих рек занимают нижние левые части графиков, хотя абсолютные размеры островов отличаются почти в 3 раза. В основном это – элементарные и малые острова каплевидной и веретенообразной формы (при этом не учитываются большие острова и островные массивы, расположенные в периферических частях русла, которые не определяют морфологию русла и его деформации), у которых показатель L_o/B_o находится в пределах 3,7–5,1 на верхней Оби и 2,0–4,6 на средней Лене, в том числе у редко встречающихся в русле этого типа больших островов (о. Пономарев в Якутском «разбое» на р. Лене, острова Фоминского разветвления на р. Оби). На участках русла с большими значениями показателей устойчивости на верхней Оби в односторонних и чередующихся односторонних разветвлениях большие острова также характеризуются соотношением ($L_o/B_o = 2,4–4,0$) [Голубцов, Чалов, 2020].

На средней Лене последовательно на графике выделяются острова в параллельно-рукавных, сложных одиночных и односторонних разветвлениях, имеющие большие размеры в чередующихся односторонних разветвлениях, образуя единую зависимость. Эти соотношения аппроксимируются уравнением вида $y=kx+b$, в котором коэффициент k возрастает от параллельно-рукавных к односторонним и сложным одиночным разветвлениям. При этом для параллельно-рукавных разветвлений, в которых преобладают элементарные и малые острова, коэффициент корреляции наибольший (0,92), а чем больше размеры островов, тем больше разброс точек на графиках и меньше коэффициент корреляции (0,77).

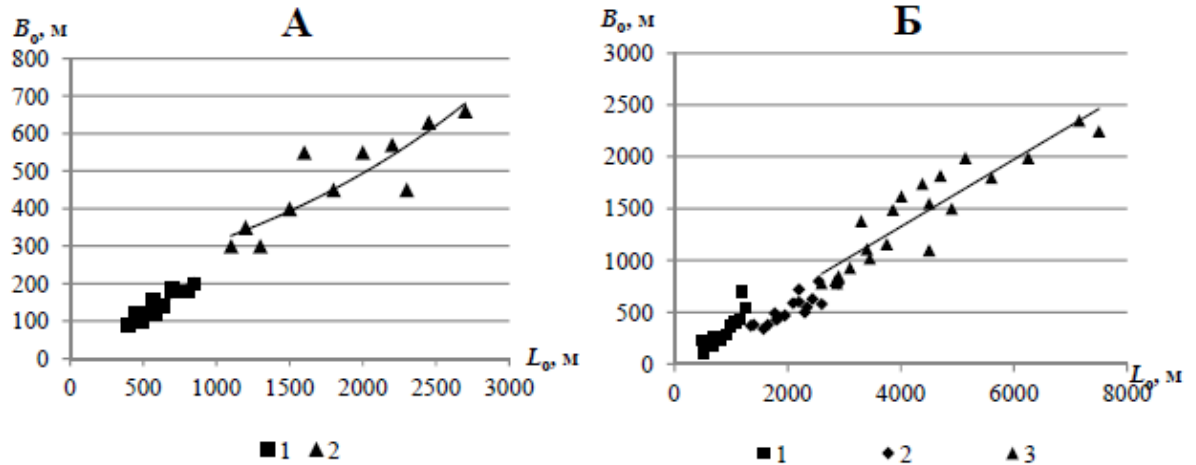


Рисунок 4.7 — Соотношение морфометрических параметров островов (L_0 , B_0) при разных типах разветвлений на верхней Оби (А: 1 – параллельно-рукавные; 2 – односторонние и чередующиеся односторонние), и средней Лене (Б: 1 – параллельно-рукавные; 2 – односторонние и одиночные; 3 – чередующиеся односторонние) [Голубцов, Чалов, 2020].

На протяженном (145 км) участке русла *нижней Лены* ниже устья р. Вилюя (до переката Сахам) параллельно-рукавные разветвления образованы, главным образом, группами островов разных размеров в центральной части русла, а также островами второго и третьего порядков в основных рукавах, в основном элементарных и малых. Рассредоточение стока возрастает из-за наличия прибрежных протоков, отделяющих от береговой поймы крупные острова в периферических частях русла. Каждый тип островов имеет свои морфометрические характеристики. От разветвлений средней Лены и тем более верхней Оби, разветвления нижней Лены отличаются, главным образом, размерами: длина и ширина даже элементарных островов здесь сопоставима с линейными размерами средних и больших островов в Якутском «разбое» средней Лены: L_0 – 1200-1500 м, B_0 – 450-550 м. Максимальные размеры больших островов превышают 8,5 км в длину и 3,5 км в ширину, обуславливая значительную суммарную ширину русла на данном участке, которая даже в местах максимального сближения стречневых зон ветвей течения (русло здесь параллельно-рукавное) в створе устья р. Лямпушки достигает 6-7 км.

Наименьшими линейными размерами обладают острова второго и третьего порядков, сформировавшиеся в основных по водности рукавах параллельно-рукавного русла. Несмотря на относительно малые размеры, их развитие, переформирования и общее количество играют значительную роль в рассредоточении стока воды как в многолетнем, так и в сезонном плане. При средней длине 2,5-3,5 км (максимальная – 5,9 км) ширина островов, как правило, не превышает 600-700 м, (минимальная – 200 м, максимальная – 950 м), что соответствует их преимущественно удлинённой форме. На

графике (рис. 4.8), соответствующие им точки расположены в нижней части под линией, обозначающей $L_0/B_0 = 4$, т.е. соотношение длины и ширины у островов такого типа на данном участке больше оптимального соотношения $L_0/B_0 = 3-4$.

Отличительной особенностью рассматриваемого участка является наличие изометричных островов, приуроченных к прибрежным, периферическим частям русла. Аналогичные острова встречаются и на средней Лене, где они образуют между основным руслом с параллельно-рукавными разветвлениями и береговой поймой проточно-островную пойму, представляющую собой архипелаг больших островов и островных массивов, разделенных узкими пойменными протоками, в том числе бывшими в относительно недалеком прошлом (конец XIX века – начало XX века) основными рукавами реки (протока Каландрашвили в «разбое» Рассолода, протока Городская в Якутском «разбое»). На Оби такие острова встречаются (не считая периферических зон русла) ниже 50 км от слияния Бии и Катунь (п. Быстрый Исток), где в русле распространены чередующиеся односторонние разветвления. Если для островов такого типа на участках параллельно-рукавных разветвлений средней Лены характерны значения коэффициента формы $L_0/B_0 > 2,5$, то при аналогичном морфодинамическом типе русла на нижней Лене – $L_0/B_0 = 2-2,5$ (минимально – 1,85). Данный тип островов на графике занимает верхнюю область, выше линии, отражающей нижнюю границу оптимального соотношения длины и ширины островов $L_0/B_0 = 3$, что свидетельствует о том, что все острова данного типа даже в условиях распространения параллельно-рукавных разветвлений имеют более изометричную форму, чем даже острова аналогичного типа в более устойчивых чередующихся односторонних разветвлениях на средней Лене (Жатайско-Кангаласский «разбой») [Голубцов, Чалов, 2020].

Острова, разделяющие на всем протяжении рассматриваемого участка широкопойменного русла средней Лены левую и правую ветви течения, занимают на графике центральную область. Они представлены всеми разновидностями – от элементарных, обладающих наименьшими размерами, до больших островов, сформировавшихся при объединении более мелких. Размеры таких островов сильно варьируют и зачастую больше чем сумма объединившихся элементарных. Это происходит вследствие включения в них бывших протоков, разделяющих элементарные острова, прослеживающихся в рельефе в виде хорошо выраженных ложбин, а также причленения отмелей и кос, расположенных по бокам и в ухвостьях островов. Это приводит к тому, что нередко большие острова в центральной части русла при своей значительной длине приобретают избыточную ширину B_0 , благодаря чему значения коэффициента их формы находится в пределах $L_0/B_0 = 3-4$.

Анализ уравнений связи показал, что даже при одном и том же морфодинамическом типе русла в условиях различающейся водности средней и нижней Лены форма островов оказывается различной. Но сохраняется при этом тенденция удлинения островов в параллельно-рукавных разветвлениях, подобно разветвлениям верхней Оби (табл. 4.3), причем на нижней Лене в уравнении вида $y=kx+b$ ($y = B_o$, $x=L_o$), коэффициент k возрастает в зависимости от положения острова в русле: он максимален для прибрежных островов и островных массивов в периферических частях русла и достигает своего минимума (с коэффициентом корреляции – 0,89) для островов 2-го порядка в основных рукавах (табл. 4.4). Для разветвлений дельтового типа в узлах слияния рек такие зависимости не прослеживаются, поскольку формирование островов здесь обусловлено рядом дополнительных гидродинамических условий (влиянием подпора со стороны притока, соотношением условий прохождения руслоформирующих расходов воды на сливающихся реках и т.д.).

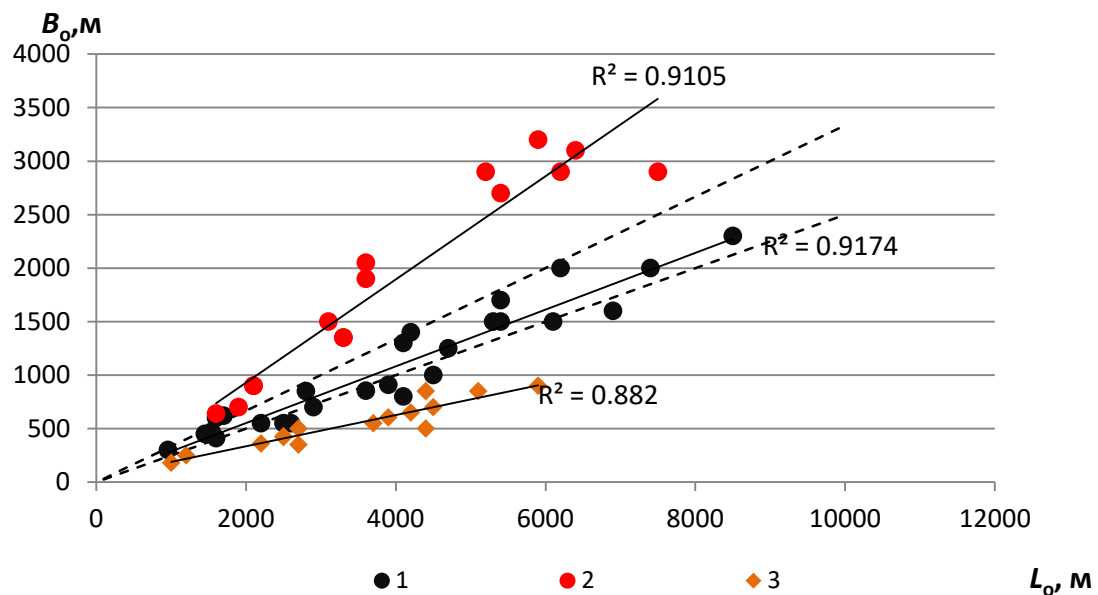


Рисунок 4.8 — Соотношение морфометрических параметров островов (L_o/B_o) параллельно-рукавных разветвлений нижней Лены. (1 – острова в центральной части русла; 2 – острова в периферических частях русла; 3 – острова в разветвлениях 2-го порядка основных рукавов). Пунктирными линиями показаны верхняя ($L_o/B_o = 3$) и нижняя ($L_o/B_o = 4$) границы оптимального соотношения.

Таблица 4.3 — Уравнения связи между шириной B_o и длиной L_o островов на верхней Оби при разных морфодинамических типах русла

Морфодинамический тип разветвлений	верхняя Обь
Параллельно-рукавные	$B_o = 0,19 L_o - 0,5$
Чередующиеся односторонние	$B_o = 0,24 L_o + 122,1$
Односторонние и одиночные	$B_o = 0,32 L_o + 85,9$
Разветвления в узлах слияния рек (слияние Бии	$B_o = 0,264 L_o + 66,8$

и Катунь)	
Разветвления в узлах слияния рек (устье Чарыша)	$B_0 = 0,21L_0 - 65,7$

Таблица 4.4 — Уравнения связи между шириной B_0 и длиной L островов на средней и нижней Лене при разных морфодинамических типах русла.

Морфодинамический тип разветвлений	средняя Лена	Коэфф. R^2	нижняя Лена	Коэфф. R^2
Одиночные	$B_0 = 0,382L_0 + 190,1$	0,88	$B_0 = 0,18L_0 + 34,7$	0,81
Параллельно-рукавные в т.ч.: - Острова в центральной части русла	$B_0 = 0,157L_0 + 45$	0,92	$B_0 = 0,265L_0 + 22,7$	0,91
- Острова в периферийной части русла	$B_0 = 0,3L_0 + 244,5$	0,79	$B_0 = 0,48L_0 - 33,9$	0,92
- Острова в разветвлениях 2-го порядка	$B_0 = 0,257L_0 + 75,5$	0,85	$B_0 = 0,15L_0 + 44$	0,89
Сопряженные	$B_0 = 0,266L_0 + 68,3$	0,83	—	—
Прибрежные: Односторонние	$B_0 = 0,302L_0 + 204,6$	0,66	—	—
Чередующиеся односторонние	$B_0 = 0,52L_0 - 604,2$	0,83	—	—
Сложные одиночные				
Пойменно-русловые	—	—	$B_0 = 0,193L_0 + 425,9$	0,78

Линейные размеры островов на верхней Оби и средней Лене. Морфометрические параметры островов являются основными показателями их формы и одним из важнейших классификационных признаков, изменяющемся в широких пределах в зависимости от типа разветвления. Однако сравнение получаемых связей соотношения длины и ширины островов на Оби и Лене может производиться только в случае введения поправочного коэффициента на размер реки, поскольку параметры русла (главным образом, его ширина

b_p) различаются не только на разных реках, но и по длине участка (на Лене) в зависимости от геолого-геоморфологических условий (строения долины чередования сужений и расширений, наличия коренных берегов и их очертаний в плане и т.д.).

Установлено, что по мере возрастания показателей устойчивости русла, увеличиваются линейные размеры островов, формирующих прибрежные (односторонние и чередующиеся односторонние) разветвления (рис 4.9). На верхней Оби они распространены ниже п. Быстрого Истока при значениях $L > 4,5$ и $K_c > 5,5$ на фоне уменьшения суммарной ширины русла по сравнению с участком непосредственно ниже слияния Бии и Катунь (первые 45 км объединенного русла). Средние значения L_o составляют 1900-2100 м, в то время как B_o изменяется в пределах от 300 до 700 м. Чаще всего такие острова относятся к средним и крупным, состоящих из нескольких малых и элементарных, имеющих меньшие размеры и шире распространенных в других типах разветвлений (одиночных и параллельно-рукавных). В табл. 4.5 представлены морфометрические характеристики, в том числе соотношение длины и ширины островов L_o/B_o , которое для описываемых типов русла находится в пределах от 2,82 до 4,69, и таким образом большинство островов имеют оптимальную, с точки зрения сопротивлений потоку, форму $L_o/B_o = 3-4$, при которых исключен их размыв или чрезмерное удлинение. При значениях $L_o/B_o < 3$, острова приобретают избыточную ширину, их форма становится близкой к изометричной. Как правило, это обуславливается расположением острова в периферической зоне русла, где происходит местная аккумуляции наносов, формируются побочни, которые объединяясь друг с другом и причленяясь к островам, увеличивают значения B_o . Наоборот, избыточно удлиненная форма $L_o/B_o > 4,5$ свидетельствует о более интенсивных русловых переформированиях, затрагивающих эти острова, приведших в итоге к утрате их первоначальной формы [Голубцов, Чалов, 2020].

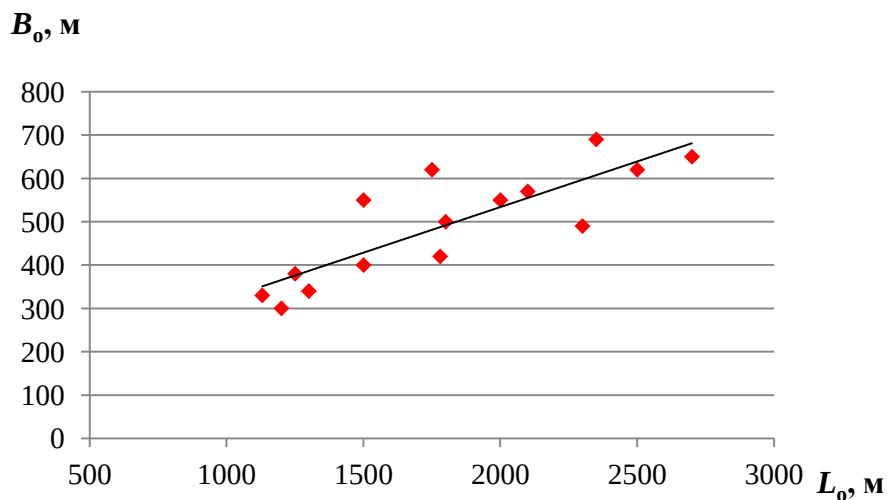


Рисунок 4.9 — Соотношение морфометрических параметров островов L_o и B_o в односторонних и чередующихся односторонних разветвлениях верхней Оби.

Таблица 4.5 — Морфометрические параметры островов в односторонних и чередующихся односторонних разветвлениях верхней Оби.

L_o	B_o	L_o/B_o
2700	650	4.15
2500	620	4.03
2300	490	4.69
2000	550	3.64
2100	570	3.68
1500	400	3.75
1200	300	4.00
1300	340	3.82
1250	380	3.29
1500	550	2.73
1130	330	3.42
1800	500	3.60
1750	620	2.82
1780	420	4.24
2350	690	3.41

В разветвлениях, формирующихся в условиях менее устойчивого русла, при $L < 3$ и $K_c < 4$, увеличивается суммарная ширина русла (зачастую при меньшей или аналогичной водности), поток распластывается, разделяется на две и более ветви течения, формируя наиболее разветвленное параллельно-рукавное русло. Основными типами островов, определяющими конфигурацию таких разветвлений, являются элементарные и малые острова, причем формирование элементарных островов – основная особенность данного типа русла (между двумя ветвями потока возникает зона замедления течения и аккумуляции наносов, приводящая сперва к образованию осередков, а затем, при их зарастании – островов). Данный тип русла вследствие большего количества островов характеризуется максимальной степенью разветвленности и наименьшими их линейными размерами. На графике (рис. 4.10) показано, что средние значения длины и ширины островов в русле данного типа на верхней Оби составляют, соответственно 200-600 м и 100-200 м. При этом максимальные значения L_o достигают 1200 м, B_o – 300 м. Практически все острова здесь сосредоточены в центральной, активной зоне русла, оказываясь в его периферии лишь в случае переформирования, приводящих к смещению всей зоны параллельно-рукавного разветвления и отмирания одного из рукавов, как правило, проходящего вдоль низкого, пойменного берега. В таком случае, острова, находящиеся в зоне замедления течения (в периферической части русла), получают

тенденцию к увеличению размеров, становясь средними или даже большими. Элементарные и малые острова, формирующиеся в параллельно-рукавных разветвлениях, чаще всего характеризуются соотношением $L_0/B_0 \geq 4$ (табл. 4.6), что говорит, с одной стороны, о сохранении ими оптимальной формы при $L_0/B_0 = 4$, или, об их удлинении в условиях размыва с оголовков, при котором наносы, поступающие в поток, аккумулируются вместе с транзитными наносами в ухвостье.

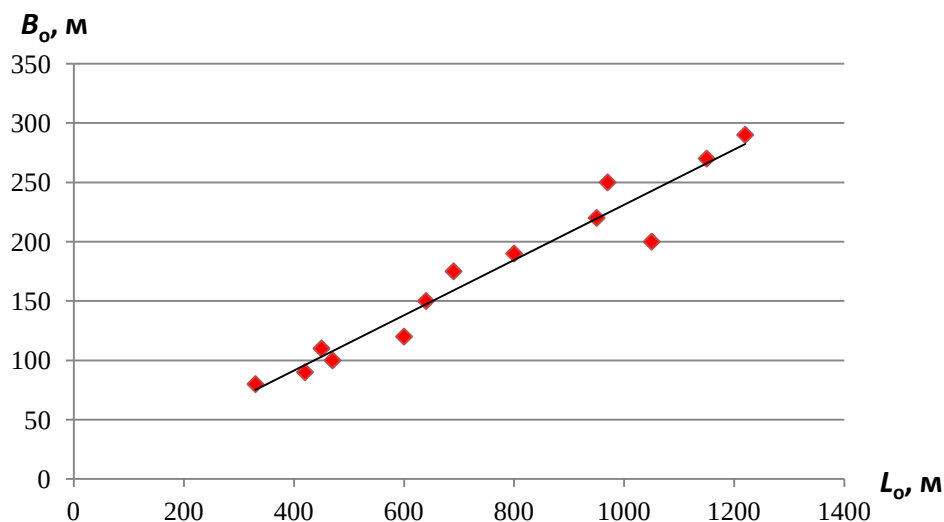


Рисунок 4.10 — Соотношение морфометрических параметров островов L_0 и B_0 в параллельно-рукавных разветвлениях верхней Оби.

Таблица 4.6 — Морфометрические параметры островов в параллельно-рукавных разветвлениях верхней Оби.

L_0	B_0	Соотношение L_0/B_0
1050	200	5.25
970	250	3.88
420	90	4.67
450	110	4.09
470	100	4.70
640	150	4.27
800	190	4.21
950	220	4.32
1150	270	4.26
330	80	4.13
690	175	3.94
600	120	5.00
1220	290	4.21

Аналогичным образом на средней Лене каждый из морфодинамических типов русла характеризуется своими параметрами островов – длиной, шириной и формой в

плане. Как и на верхней Оби, наиболее устойчивым участкам на средней Лене соответствуют односторонние и чередующиеся односторонние разветвления, формируемые, однако, островами более крупных размеров. Это обусловлено, прежде всего, различием в водности рек, поскольку по этому показателю средняя Лена (по данным г.п. Табага в районе г. Якутска) превосходит верхнюю Обь (г.п. Фоминское) в 6,15 раза. На графике (рис. 4.11) прослеживается связь длины и ширины средних и крупных островов, размеры которых в среднем достигают 4-6 км в длину и 1-2 км в ширину, при максимальных значениях $L_o = 7500$ м, $B_o = 2350$ м. Наименьшие размеры в разветвлениях такого типа имеют острова расположенные в периферической части русла в менее водных рукавах (чаще всего их водность находится в пределах 10-20 %). В таком случае длина островов не превышает 2,5 км, ширина – 1 км.

Конфигурация разветвлений, расположенных в периферической части русла, обуславливают значение соотношения L_o/B_o в пределах от 2,5 до 4 (табл. 4.7). При этом значительная часть островов характеризуется показателем $L_o/B_o < 3$, что свидетельствует о большей, по сравнению с аналогичными разветвлениями на верхней Оби, их ширине. Это связано как с возрастающей водностью самой реки и ее бóльшей шириной, так и с местными условиями, определяющими поступление наносов, их аккумуляцию и приводящими к увеличению размеров островов. При этом наиболее изометричные острова, располагаясь в центральной части архипелагов и формирующие облик узла разветвления, характеризуются наименьшими переформированиями. Наоборот, более вытянутые, веретенообразные по форме острова чаще всего формируются ближе к стрежневой зоне потока и обычно более подвержены активным деформациям.

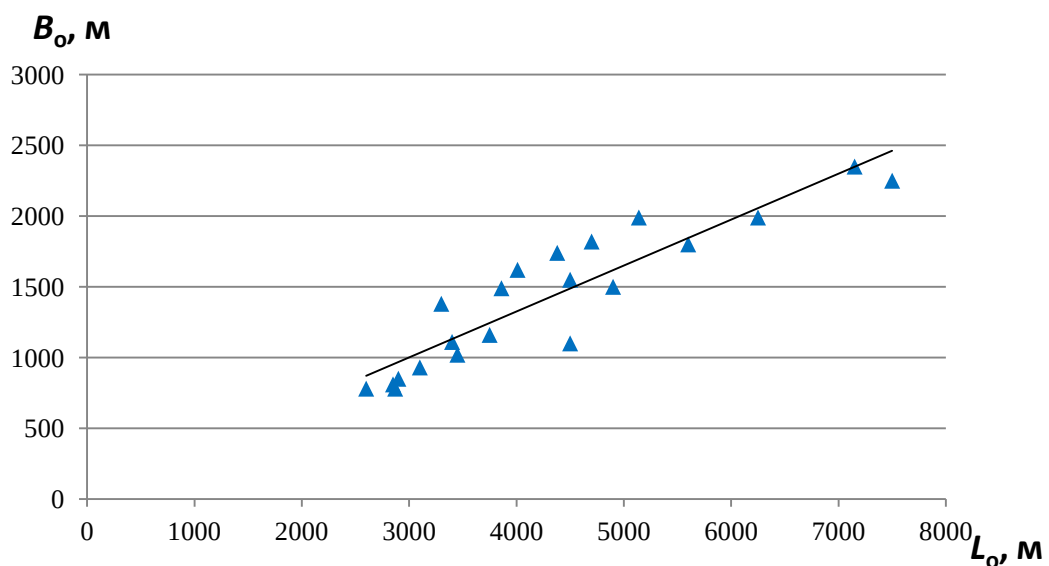


Рисунок 4.11 — Соотношение морфометрических параметров островов L_o и B_o в односторонних и чередующихся односторонних разветвлениях средней Лены

(на участке г. Покровск – устье р. Алдана)

Таблица 4.7 — Морфометрические параметры островов в односторонних и чередующихся односторонних разветвлениях средней Лены
(на участке г. Покровск – устье р. Алдан)

L_0	B_0	Соотношение L_0/B_0
2600	780	3.33
3100	930	3.33
2850	810	3.52
3400	1110	3.06
3300	1380	2.39
2870	780	3.68
3450	1020	3.38
3860	1490	2.59
3750	1160	3.23
4010	1620	2.48
4700	1820	2.58
5140	1990	2.58
4380	1740	2.52
6250	1990	3.14
4500	1100	4.09
2900	850	3.41
4500	1550	2.90
7150	2350	3.04
7500	2250	3.33
5600	1800	3.11
4900	1500	3.27

Более сложная картина наблюдается в параллельно-рукавных разветвлениях средней Лены, формирующихся в условиях пониженной устойчивости русла ($L \leq 9,5$; $K_c \leq 10$) и распластывания потока при его значительной водности и ширине. Все это обуславливает увеличение количества островов при их относительно небольших линейных размерах, преобладание элементарных и малых (возникших путем объединения 2-3 элементарных) островов. В зависимости от этапа развития и подверженности деформациям, линейные размеры большинства островов в параллельно-рукавном русле находятся в пределах от 2 до 6 км в длину и от 250 до 2000 м в ширину.

Большое количество рукавов и протоков, их значительная протяженность, а также многолетние и сезонные колебания их водности приводят к формированию в них разветвлений второго и третьего порядков. Такие разветвления рукавов параллельно-рукавных разветвлений, как правило, характеризуются островами меньших размеров по сравнению с островами, формирующими основные разветвления. В связи с этим на

графике (рис. 4.12) выделяются две группы островов: образовавшихся в активной части русла и в разветвлениях 2-го порядка основных рукавов. При приблизительно одинаковой длине, первые характеризуются большей шириной (в среднем на 700-900 м) и, соответственно, меньшим показателем $L_o/B_o \leq 3,5$ (минимально – 2,32). При этом лишь небольшая их часть лежит в пределах гидравлически оптимальных значений. Группа островов в разветвлениях 2-го порядка обладает меньшей шириной (не более 1200-1300 м) при такой же длине, благодаря чему они приобретают вытянутую веретенообразную форму. В табл. 4.8 значения L_o/B_o практически везде > 4 , достигая для отдельных островов значений 6 и даже 8. При таких значениях они приобретают вытянутую, сложную форму, обрастая косами в ухвостье в результате перемещения сюда наносов поступающих при размыве их оголовков. Это приводит, с одной стороны, к еще большему удлинению островов, а с другой, к их трансгрессивному смещению в русле в ходе русловых переформирований.

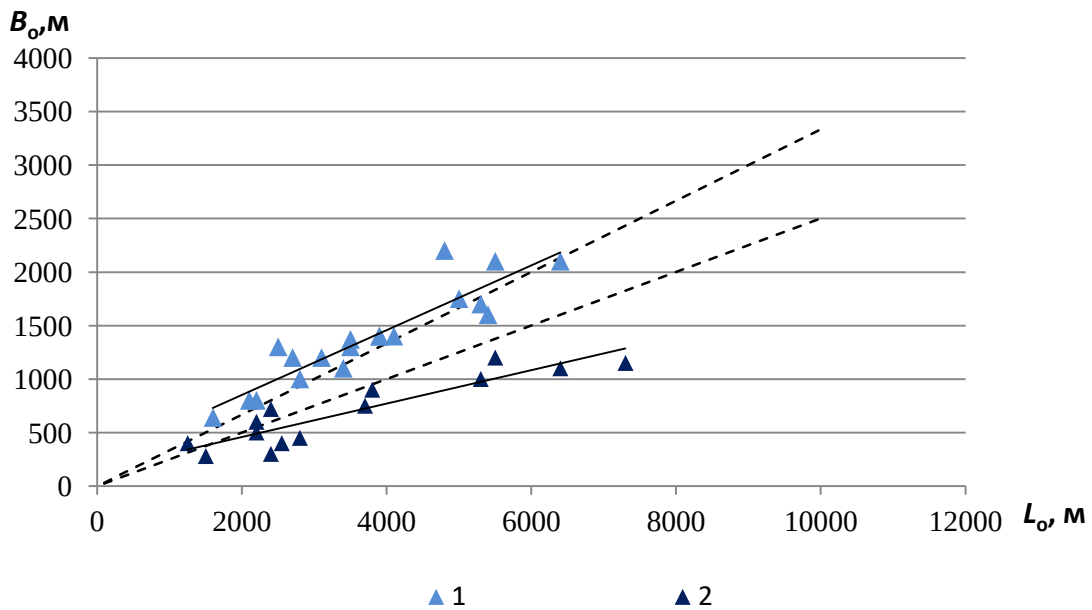


Рисунок 4.12 — Соотношение морфометрических параметров островов L_o и B_o в параллельно-рукавных разветвлениях средней Лены: 1 – острова в активной части русла; 2 – острова в разветвлениях 2-го порядка основных рукавов. Пунктирными линиями показаны верхняя ($L_o/B_o = 3$) и нижняя ($L_o/B_o = 4$) границы оптимального соотношения.

Таблица 4.8 — Морфометрические параметры островов в параллельно-рукавных разветвлениях средней Лены (на участке г. Покровск – устье р. Алдан)

<i>Острова в активной части русла</i>			<i>Острова 2-го порядка в разветвлениях основных рукавов</i>		
L_o	B_o	Соотношение L_o/B_o	L_o	B_o	Соотношение L_o/B_o
4100	1400	2.92	2550	400	6.36

6400	2100	3.04	1500	280	5.35
5000	1750	2.85	5300	1000	5.3
3500	1370	2.55	5500	1200	4.58
3900	1400	2.78	2200	600	3.66
5300	1700	3.11	2400	300	8
2800	1000	2.8	2800	450	6.22
2200	800	2.75	2200	500	4.4
1600	640	2.5	2400	720	3.33
2100	800	2.62	3700	750	4.93
2500	1300	1.92	3800	900	4.22
5500	2100	2.61	1250	400	3.13
3400	1100	3.09	6400	1100	5.81
3100	1200	2.58	7300	1150	6.34
3900	1400	2.78			
4800	2200	2.18			
3500	1300	2.69			
5400	1600	3.37			
2700	1200	2.25			

Сравнительная морфолого-морфометрическая характеристика островов

Линейные размеры островов крайне неодинаковы не только в разветвлениях разного типа, но и даже при одинаковом морфодинамическом типе русла. Эти различия определяются параметрами самого русла – его шириной – b_p и водностью реки Q . Для введения поправочного коэффициента на размер рек ширины их русел должны определяться для участков с одинаковым морфодинамическим типом. Так, средняя ширина русла верхней Оби (b_{po}) с преобладающими прибрежными (односторонними и чередующимися односторонними разветвлениями) в $\approx 2,9$ раза меньше, чем ширина русла средней Лены (b_{pl}) при аналогичном типе разветвлений. Принимая во внимание сохранение нормальной, каплевидной формы островов (диапазон значений показателя формы $3 \leq L_o/B_o \leq 4$) на обоих участках, и увеличивая значения L_o и B_o на коэффициент 2,9, получаем единую связь между этими параметрами (рис. 4.13, табл. 4.9), при которой линейные размеры островов на двух разных участках рек сопоставимы и образуют общую зависимость с высоким коэффициентом корреляции (0,82).

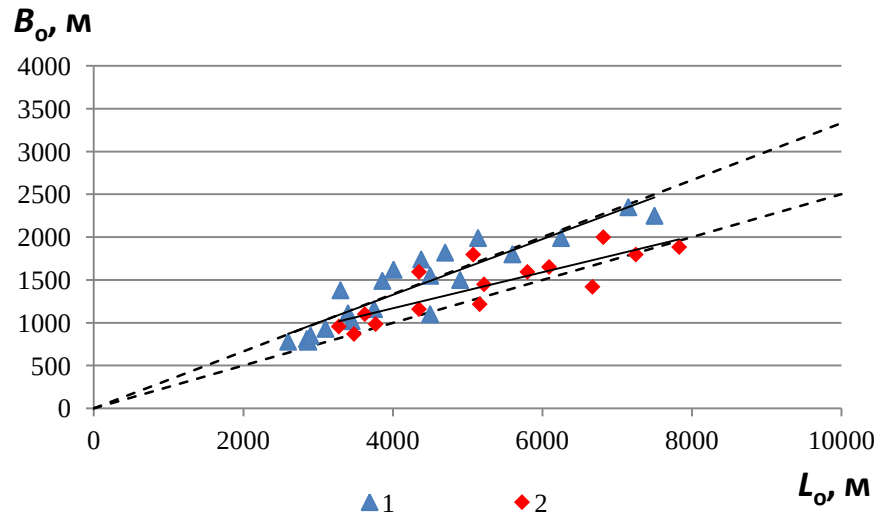


Рисунок 4.13 — Соотношение морфометрических параметров островов L_o и B_o в односторонних и чередующихся односторонних разветвлениях с учетом переходного коэффициента $\alpha \approx 2,9$ на суммарную ширину рек b_p : 1 – средняя Лена; 2 – верхняя Обь, $\alpha L_o, \alpha B_o$. Пунктирными линиями показаны верхняя ($L_o/B_o = 3$) и нижняя ($L_o/B_o = 4$) границы оптимального соотношения.

Таблица 4.9 — Морфометрические параметры островов в односторонних и чередующихся односторонних разветвлениях верхней Оби и средней Лены с учетом переходного коэффициента α на суммарную ширину рек b_p .

средняя Лена			верхняя Обь		
L_o	B_o	Соотношение L_o/B_o	L_o	B_o	Соотношение L_o/B_o
2600	780	3.33	7830	1885	4.15
3100	930	3.33	7250	1798	4.03
2850	810	3.52	6670	1421	4.69
3400	1110	3.06	5800	1595	3.64
3300	1380	2.39	6090	1653	3.68
2870	780	3.68	4350	1160	3.75
3450	1020	3.38	3480	870	4.00
3860	1490	2.59	3770	986	3.82
3750	1160	3.23	3625	1102	3.29
4010	1620	2.48	4350	1595	2.73
4700	1820	2.58	3277	957	3.42
5140	1990	2.58	5220	1450	3.60
4380	1740	2.52	5075	1798	2.82
6250	1990	3.14	5162	1218	4.24
4500	1100	4.09	6815	2001	3.41
2900	850	3.41	7830	1885	4.15
4500	1550	2.90	7250	1798	4.03
7150	2350	3.04	6670	1421	4.69

7500	2250	3.33	5800	1595	3.64
------	------	------	------	------	------

Аналогичный переходный коэффициент можно применить и для получения связи линейных размеров островов в менее устойчивом параллельно-рукавном русле. Однако местные геолого-геоморфологические факторы приводят к расширению дна долины, и, соответственно увеличению ширины русла как на Оби, так и на Лене. Для последней значения b_p в относительно прямолинейном неразветвленном русле и на наиболее широких участках могут отличаться в несколько раз: от 2300 м до 7900 м. На верхней Оби непосредственно ниже слияния Бии и Катунь на участке распространения параллельно-рукавных разветвлений распластывание потока приводит к увеличению ширины русла, в то время как ниже по течению она уменьшается (при возрастающей водности). В результате соотношение $b_{рл}/b_{ро}$ (индексы Л и О обозначают принадлежности параметра к Лене или Оби) на участках с менее устойчивыми параллельно-рукавными и сложными одиночными разветвлениями $\approx 5,91$. Увеличивая значения длины и ширины на величину переходного коэффициента получаем единый график связи (рис. 4.14), где для средней Лены острова разделяются на 2 группы, поскольку в отдельную группу входят острова в разветвлениях 2-го порядка, обладающие своими характерными морфометрическими особенностями. При этом параметры островов верхней Оби наилучшим образом коррелируют именно с этой группой островов Лены, образуя единую зависимость в нижней части графика, причем большинство этих островов имеют соотношение длины и ширины $L_o/B_o > 4$ (табл. 4.10).

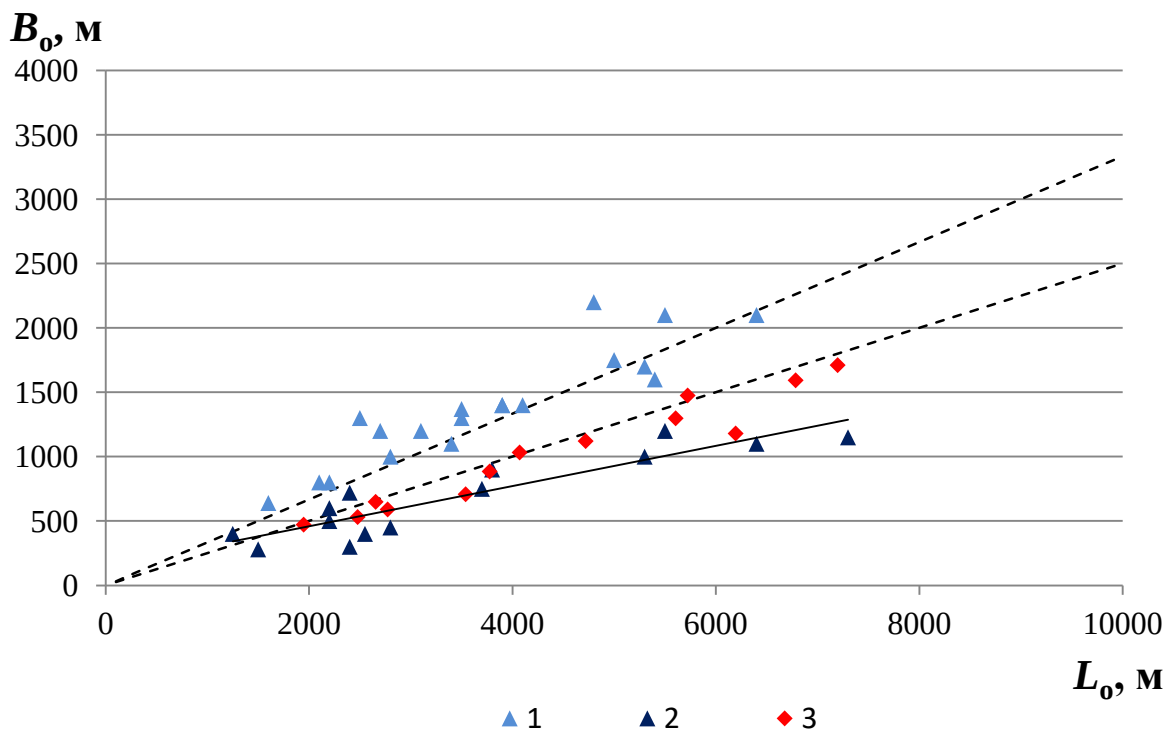


Рисунок 4.14 — Соотношение морфометрических параметров островов L_0 и B_0 в параллельно-рукавных разветвлениях с учетом переходного коэффициента α на суммарную ширину рек b_p : 1 – острова в активной части русла; 2 – острова в разветвлениях 2-го порядка основных рукавов (на средней Лене); 3 – верхняя Обь, αL_0 , αB_0 . Пунктирными линиями показаны верхняя ($L_0/B_0 = 3$) и нижняя ($L_0/B_0 = 4$) границы оптимального соотношения.

Таблица 4.10 — Морфометрические параметры островов в параллельно-рукавных и сложных одиночных разветвлениях верхней Оби и средней Лены с учетом переходного коэффициента α на суммарную ширину рек b_p

Средняя Лена						Верхняя Обь		
<i>Параллельно-рукавные и сложные одиночные разветвления</i>						<i>Параллельно-рукавные разветвления</i>		
<i>Острова в активной части русла</i>			<i>Острова в разветвлениях 2-го порядка основных рукавов</i>					
L_0	B_0	L_0/B_0	L_0	B_0	L_0/B_0	L_0	B_0	L_0/B_0
5000	1750	2.86	2550	400	6.38	6195	1180	5.25
3500	1370	2.55	1500	280	5.36	5723	1475	3.88
3900	1400	2.79	5300	1000	5.30	2478	531	4.67
5300	1700	3.12	5500	1200	4.58	2655	649	4.09
2800	1000	2.80	2200	600	3.67	2773	590	4.70
2200	800	2.75	2400	300	8.00	3776	885	4.27
1600	640	2.50	2800	450	6.22	4720	1121	4.21
2100	800	2.63	2200	500	4.40	5605	1298	4.32
4100	1400	2.93	2400	720	3.33	6785	1593	4.26
6400	2100	3.05	3700	750	4.93	1947	472	4.13
2500	1300	1.92	3800	900	4.22	4071	1033	3.94
5500	2100	2.62	1250	400	3.13	3540	708	5.00
3400	1100	3.09	6400	1100	5.82	7198	1711	4.21
3100	1200	2.58	7300	1150	6.35			
3900	1400	2.79						
4800	2200	2.18						
3500	1300	2.69						
5400	1600	3.38						
2700	1200	2.25						

Сложность и многообразие характеристик островов, формирующихся в русле с разными морфодинамическими типами не позволяет проводить сравнение полученных зависимостей и связей напрямую, что обусловлено, прежде всего, влиянием размеров реки, и ее водности, что, в свою очередь делает невозможным применение одних и тех же значений устойчивости и показателей степени разветвленности русла. Введение поправочных коэффициентов позволяет нивелировать эти различия и проводить

сравнительный анализ как для участков с разным морфодинамическим типом русла, так и в условиях аналогичных типов русла, но на разных реках.

4.3. Динамика островов в широкопойменных руслах больших рек.

Деформация островов и изменение их морфометрических параметров определяются кинематической структурой потока (его скоростным полем, циркуляционными течениями) и, в обратной связи, острова, вызывая рассредоточение стока по рукавам, оказывает большое влияние на кинематику потока. В этом заключается проявление одного из общих законов русловых процессов, сформулированный М.А. Великановым и Н.И. Маккавеевым – единства системы «поток–русло». Возле острова во все фазы водного режима формируется новая, соответствующая ему структура потока, и присущие изгибу русла циркуляционные течения (рис. 4.15,А), благодаря которым, происходит преобразование осередка, имеющего форму «капли», направленной вниз по течению, в остров, форма которого из-за его размыва с оголовка и аккумуляции наносов в ухвостье (при прочих равных условиях), создающей косу, приобретает вид «капли», но обращенной против течения (рис. 4.15,Б) [Маккавеев, 1955; Чалов, Кирик, 2015; Эрозионно-русловые системы, 2017].

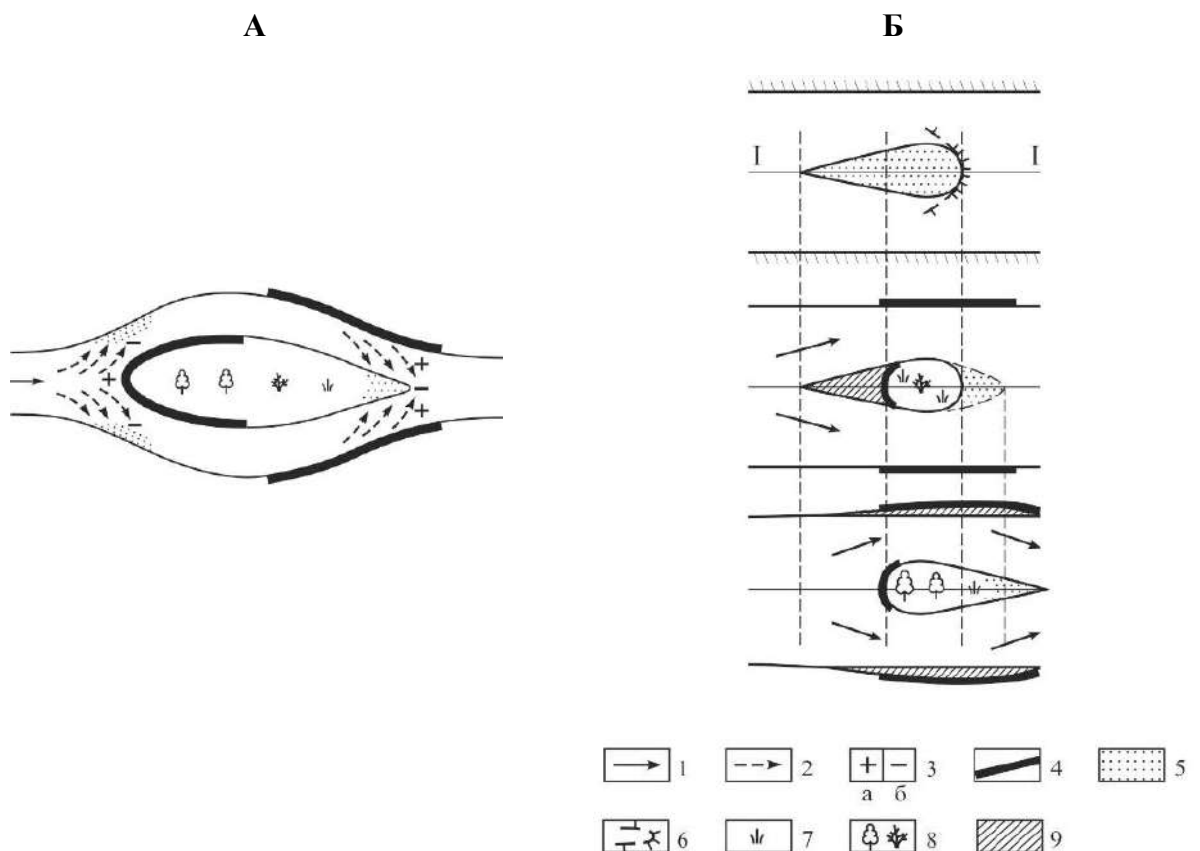


Рисунок 4.15 — Структура потока в разветвленном русле возле острова (А) и схема трансформации осередка в остров (Б). 1 – направление течения; 2 – направление донных

струй потока; 3 – области повышения (а) и понижения (б) водной поверхности, 4 – зоны ускорения течения и размывов берегов; 5 – зоны замедления течения и аккумуляции наносов; 6 – подвалье гряды (осередка); 7 – первичная растительность на осередке и в ухвостье острова; 8 – древесная и кустарниковая растительность на острове; 9 – размывы части осередка, острова и берегов [Чалов, Кирик, 2015].

Зоны ускорения (роста скоростей) течения располагаются у берегов острова от его оголовка до створа, где он имеет наибольшую ширину, что соответствует вершине излучины рукава. Циркуляционные течения и увеличение скоростей потока приводят к тому, что оголовки острова постепенно размываются, а на противоположных ему берегах в зонах замедления течения происходит аккумуляция наносов. В низовой части разветвления, в узле слияния рукавов, наоборот, остров наращивается, а противоположные ему берега размываются. По Н.И. Маккавееву [Проектирование ..., 1964, с. 214], «остров, смещаясь вниз по реке, как бы раздвигает ее берега, которые снова смыкаются при прохождении вершины острова». Наряду с распределением скоростей течения и образованием зон его ускорения и замедления возле острова, перед ним и на всем протяжении разветвления свободная поверхность потока трансформируется, возникают поперечные перекосы водной поверхности, направленные как от острова к берегам, так и от берегов к острову. Поток в каждом рукаве, огибая остров, образует излучины, в пределах которых также формируются соответствующие перекосам водной поверхности циркуляционные течения. Дополнительное повышение уровня водной поверхности у оголовка острова и образование депрессий у берегов реки вызывают в придонных слоях потока отклонение струй от оси русла и от оголовка к берегам, активизируя его размыв и аккумуляцию наносов у противоположных берегов. При детальном исследовании на основе анализа поверхностных скоростей течения средней Лены (рис. 4.16) зоны повышенных скоростей хорошо прослеживаются у оголовков островов, а также непосредственно ниже его, вплоть до наиболее широкой части разветвления, и наоборот, постепенно уменьшаются по мере приближения к ухвосту.

Такое трансгрессивное (вниз по течению) смещение островов и связанных с ними разветвлений определяется самой структурой потока, возникающей при образовании острова и при направленном слабом врезании русел верхней Оби [Маккавеев, Чалов, 1964] и средней и нижней Лены [Борсук, Чалов, 1973], в общем случае преобладает среди островов, образующих основные разветвления в активной части русла. Таким образом, преимущественно трансгрессивное смещение островов характерно именно в центральной части русла, где отдельный остров или верхний из них в архипелаге островов образуют узел разветвления в условиях, когда транспортирующая способность потока больше стока наносов ($W_{тр} > W$). В периферической части русла, где вне зависимости от общего баланса

наносов на реке расположена зона аккумуляции наносов, подпор, возникающий перед оголовком острова, обуславливает аккумуляцию наносов, формирование возле него отмели и регрессивное смещение острова.

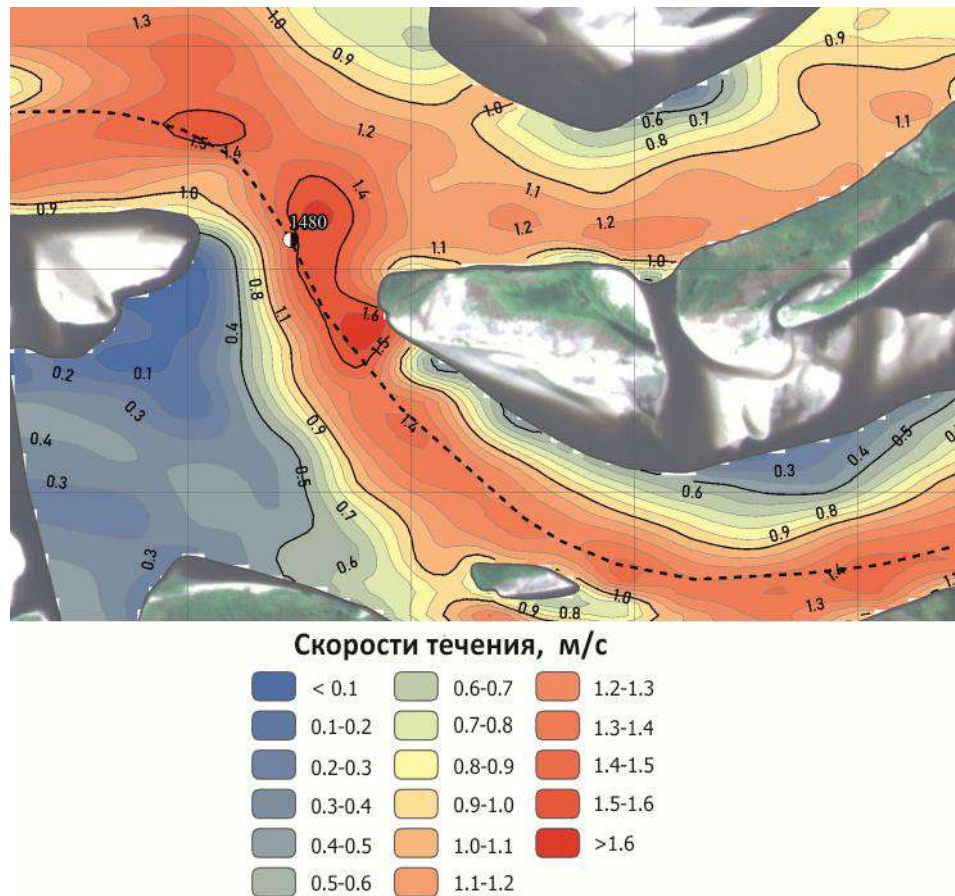


Рисунок 4.16 — Схема распределения скоростей течения водного потока (скоростное поле) средней Лены на 1481-1475 км с/х.

Если разделение русла островом несимметрично или скорости течения в истоках рукавов неодинаковы, возникает общий перекося водной поверхности в сторону одного из рукавов. Зачастую такой перекося может способствовать дальнейшим русловым переформированиям, в частности перераспределению стока и преимущественному развитию одного рукава, являющегося прямым продолжением русла на смежном вышележащем участке.

Очевидно, не меньшее значение имеет явление набегания потока на оголовок острова (его динамическая ось прижимается к нему) и, соответственно, угол встречи уступа оголовка со стрежнем потока (90°), и происходящее при этом сжатие потока и местное увеличение скоростей (рис. 4.17). Такие явления, отмеченные на верхней Оби (ниже п. Быстрый Исток) и нижней Лене (о. Бол. Соболиный), приводят к очень высоким темпам отступления оголовков, превышающих скорости аккумуляции в ухвостье, что

приводит и к формированию вертикальных стенок у краев оголовка, и к сокращению длины острова и изменению его формы.

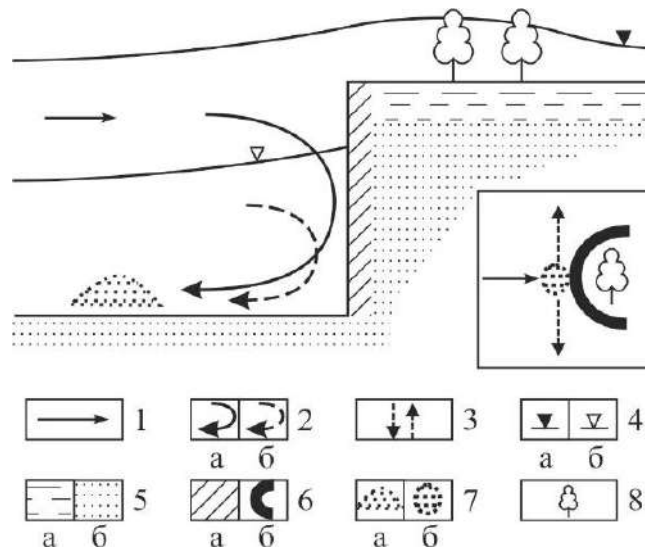


Рисунок 4.17 — Течения, возникающие у оголовка острова, и связанный с ними его размыв. 1 – течения, набегающие на оголовок под углом $\sim 90^\circ$; 2 – вихрь с горизонтальной осью при затоплении поймы (а) и в межень (б); 3 – направление донных струй; 4 – уровень водной поверхности при затопленной пойме (а) и в межень (б), 5 – аллювиальные отложения: пойменная фация – наилок (а), русловая фация (б); 6 – размываемый берег в профиле (а) и на плане (б); 7 – вынос размываемого материала на профиле (а) на плане (б); 8 – растительность на пойме [Чалов, Кирик, 2015].

Иной вид имеет поверхности воды в районе ухвостья острова. Здесь у берегов отметки водной поверхности выше, чем возле него, создается поперечный уклон от берегов к ухвостью острова, соответствующее направление принимают и донные струи потока. Так как именно они обеспечивают транспорт влекомых наносов, происходит постепенное наращивание ухвостья и формирование на его продолжении косы. Из-за неодинакового характера русел и скоростей течения в сливающихся рукавах средняя отметка водной поверхности в каждом из них в створе ухвостья может быть неодинаковой, что является причиной общего перекоса водной поверхности, поперечный уклон при этом направлен в сторону того рукава, в низовьях которого глубины больше и меньше скорости течения.

Достаточно часто на реках встречаются острова, растущие со стороны оголовка, т.е. регрессивно, вследствие аккумуляции наносов и образования возле него отмели. Такие острова приобретают веретенообразную в плане форму, у которой $L_o/B_o > 3-4$ (рис. 4.18,А). Зачастую отмель обрывается к оголовку подвальем, опоясывающим его с обеих сторон, а между ними и островом находится глубокая, узкая (шириной в зависимости от размеров реки от 10-15 до 70-100 м) (рис. 4.18,Б) и изогнутая в плане протока. Направление течения в ней зависит от соотношения уровней воды в рукавах, огибающих

остров, и может меняться в разные фазы водного режима. Например, такая протока, функционирует перед оголовком одного из островов в сложном одиночном Покровском разветвлении на средней Лене (1720-1725 км). В период повышения уровней, направление течения в этой протоке устанавливается в направлении слева направо (рис. 4.19,А), в межженный период наоборот – справа налево (рис. 4.19,Б)

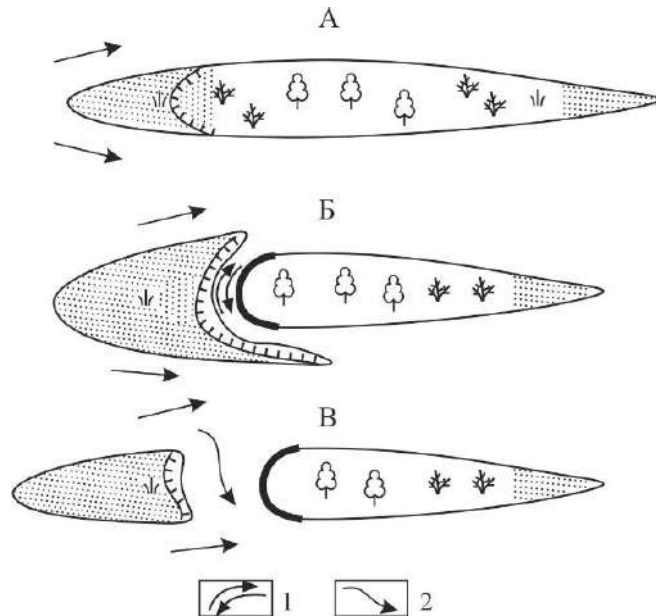


Рисунок 4.18 — Формы регрессивного смещения острова: А – причленение к оголовку отмели; Б – образование перед оголовком отмели, отделенной от него узкой и глубокой протокой с переменным течением; В – формирование осередка, отделенного от острова широкой протокой. 1 – переменное течение в протоке, 2 – направленное течение в протоке [Чалов, Кирик, 2015].

Таким образом, отмель фактически является осередком перед островом, которая в некоторых условиях со временем при зарастании может превратиться в самостоятельный элементарный остров, но очень близко расположенный к исходному острову и, по существу, образующий с ним единое целое. При занесении проток наносами они сохраняется в рельефе острова в виде глубоких, с четкими бортами ложбин изогнутой формы. В некоторых случаях осередок может надвигаться на остров и причленяться к его оголовку, однако по мере дальнейших деформаций это не исключает размыв оголовка острова и начало его трансгрессивного смещения. Оно происходит из-за течений в поперечной протоке между оголовком и подвалом отмели перед ним, так как перепад уровней между рукавами у оголовка острова может быть весьма значительным, превышающим продольный средний уклон свободной поверхности потока, и поэтому скорости течения в ней оказываются больше, чем в основном русле, и по данным

измерений могут достигать на средней Лене 1,6-1,7 м/с, что в 1,5 раза больше чем средние в основных рукавах.

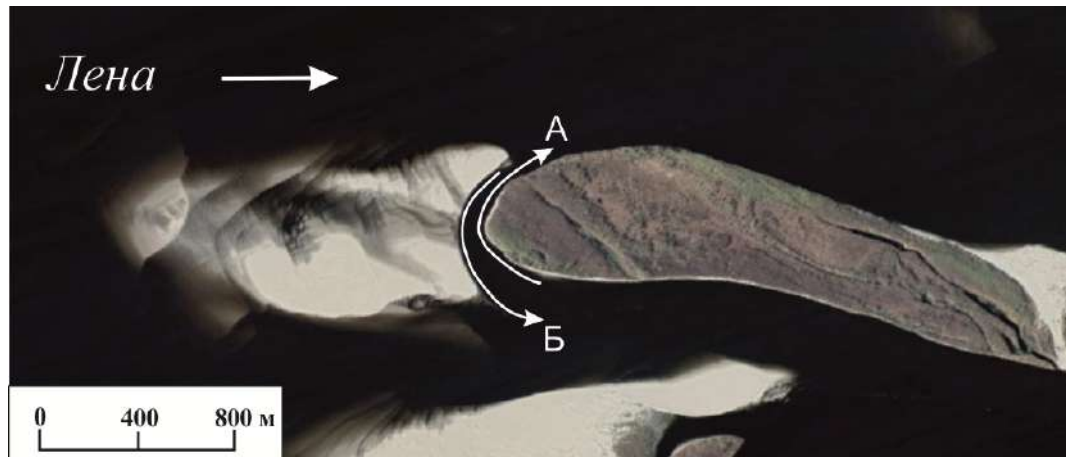


Рисунок 4.19 — Положение протоки с переменным течением у острова Митька-Калыкыната в Покровском разветвлении средней Лены: А – направление течения в период повышения уровней; Б – направление течения в период понижения уровней.

В некоторых случаях протока между отмелью-осередком и оголовком острова оказывается достаточно широкой и удаленной от острова на расстояние (на больших реках) до 100-200 м и более (рис. 4.18,В). Формирующиеся осередки со временем образуют цепочку, вытянутую вверх от первичного острова. По этим протокам из-за разницы уровней в рукавах осуществляется перераспределение расхода воды между основными рукавами. Благоприятные условия для регрессивного роста островов создаются в параллельно-рукавных разветвлениях, особенно в тех, где в центральной части русла формируются группы островов, своеобразные «архипелаги», создающие дополнительные условия для замедления течения посередине реки, аккумуляции наносов и формирования отмелей. Очень часто (особенно при увеличении разницы в водности основных рукавов) между ними осуществляется частичное перемещение стока воды из одного основного рукава в другой. Некоторые из этих квазипоперечных проток и рукавов имеют достаточные глубины и скорости течения, и тогда к оголовку острова прижимается стрежень потока, и он размывается, иногда со значительными скоростями (одновременно идет их рост со стороны ухвостья). В определенных условиях может произойти зарастание осередков перед оголовком острова и превращение его в элементарный или даже малый (при объединении элементарных) остров. В зависимости от типа разветвления и ширины такой протоки на крупнейших реках (нижняя Лена) водность поперечных проток может достигать 20 и даже 25-30 %, вследствие чего они играют важную роль в рассредоточении стока и русловых переформированиях. Таковы, например, поперечные протоки в параллельно-рукавных разветвлениях Черпальский и Сахам на нижней Лене (рис. 4.20). В

случае если изначально, вследствие меньшей водности морфометрические параметры таких островов меньше, то по этим протокам также осуществляется перераспределение стока между рукавами, но с меньшей долей водности (10-15%) (рис. 4.21).

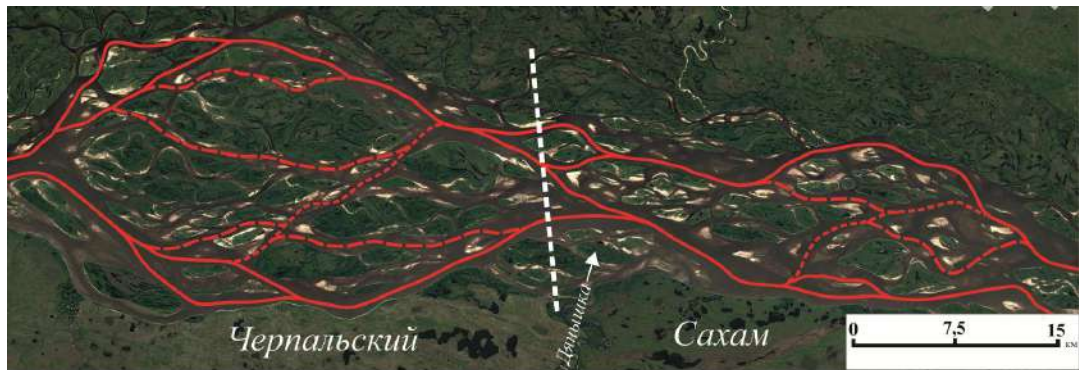


Рисунок 4.20 — Положение поперечных проток (пунктирные линии) на схеме стрежневых зон потока в параллельно-рукавных разветвлениях нижней Лены

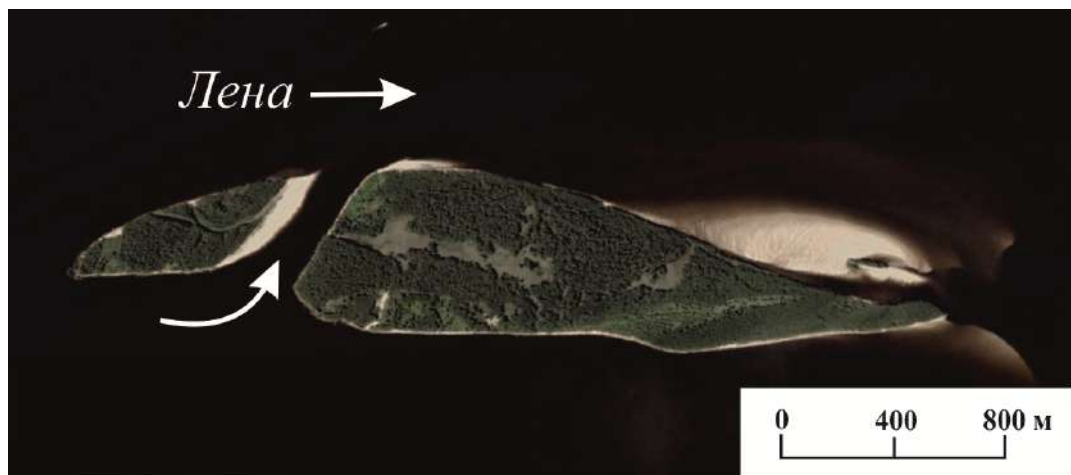


Рисунок 4.21 — Схема расположения острова перед оголовком, отделенного протокой на средней Лене («разбой» Рассолода)

Рост островов в сторону, противоположную течению реки (регрессивно) в первую очередь связан с положительным балансом наносов и характерен для условий, когда транспортирующая скорость потока меньше стока наносов ($W_{тр} < W$). Такие условия создаются, прежде всего, в результате подпоров в местах впадения притоков, а также мощными местными источниками поступления наносов (в т.ч. теми же притоками, или вследствие особенностей геолого-геоморфологического строения берегов). В случае, когда на протяженных участках рек имеет место направленная аккумуляция наносов, то регрессивное смещение форм русла было ее главным признаком [Проектирование..., 1964; Чалов, 2007]. Однако если острова находятся в периферической части русла, где закономерно происходит уменьшение скоростей потока, то основной причиной их регрессивного роста является именно это условие, где наносы аккумулируются вне зависимости от направленности вертикальных деформаций, и в таком случае, даже на

врезающееся реке с отрицательным балансом наносов. Поэтому формирующиеся здесь острова имеют отмели возле оголовков и приобретают удлинённую форму, характеризуясь при этом регрессивным смещением в многолетнем плане.

Как регрессивное, так и трансгрессивное смещение острова со стороны оголовка сопровождается одновременно ростом косы (или кос) в его ухвостье, вследствие чего происходит общее удлинение острова – вверх и вниз по течению. В этих случаях острова приобретают веретенообразную форму и соотношение $L_o/B_o \gg 4$. Однако, под влиянием местных условий поток из рукава может направляться на ухвостье острова, вызывая его частичный размыв или стабилизацию. Это происходит при направляющем влиянии вогнутого берега или выступов коренных пород. Кроме того, уменьшение темпов роста и смещения ухвостий связано с разницей в скоростях аккумуляции и размыва (при прочих равных условиях первая всегда на порядок больше). Это приводит к росту транспортирующей способности и сокращению темпов аккумуляции наносов ниже области размыва.

Трансгрессивное смещение острова наблюдается в Якутском узле, где русловые переформирования сопровождаются размывом оголовка о. Пономарев со средними скоростями 10-20 м/год. На фоне размыва ниже по течению у его ухвостья формируется зона аккумуляции и происходит рост косы (рис. 4.22). Одновременно идет развитие плесовой лощины в левом рукаве – Адамовской протоке и активизация размывов левого берега в ее нижней части, где был смыт прибрежный о. Софон (к 2021 году он перестал существовать), создававший разветвление 2-го порядка.

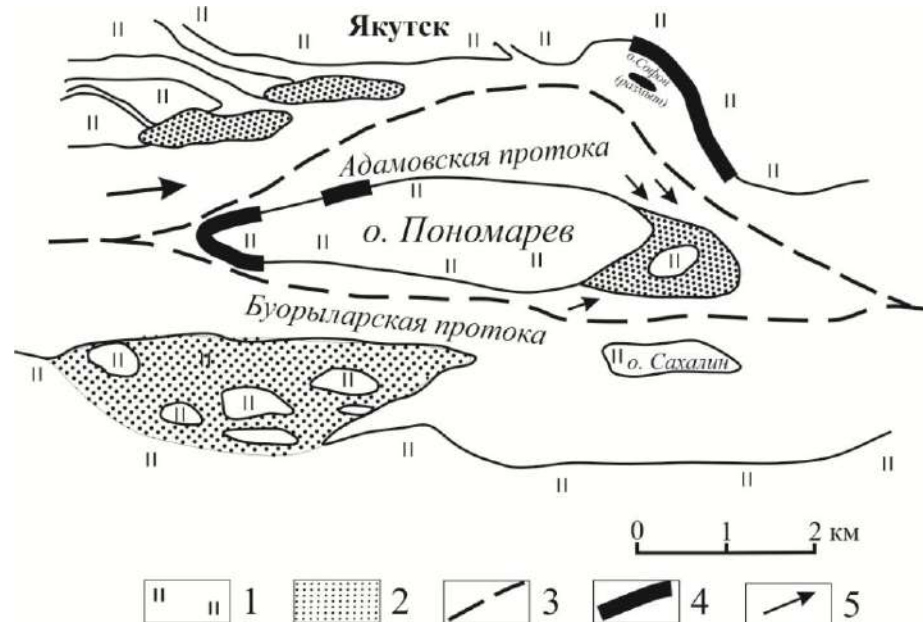


Рисунок 4.22 — Схема русловых деформаций в Якутском узле разветвления и положение зон размыва. 1 – пойма; 2 – прирусловые отмели, зоны аккумуляции наносов; 3 – положение строжневых зон потока; 4 – положение зон размыва; 5 – направление течения.

Ниже слияния рукавов – правой (Буорыларской) и Адамовской проток – поток прижимается к правому берегу, вызывая его размыв, и в течение 56 лет (с 1962 по 2018 гг.) скорости отступления берега составляли 20-25 м в год (рис. 4.23). В левобережной части русла (слева от о. Жатайский и в его ухвостье) возникла область аккумуляции наносов, только за период с 2002 г прирусловые отмели в ухвостьях островов сместились на 2 км.

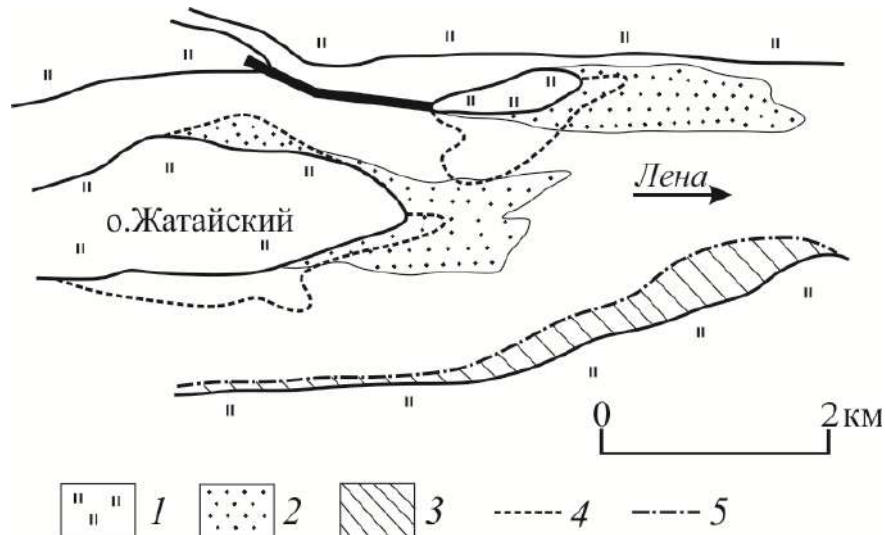


Рисунок 4.23 — Рост отмелей и размыв берегов и островов в районе п. Жатай на средней Лене: 1 – пойма; 2 – прирусловые отмели; 3 – размыв берега в период с 2002 по 2018; 4 – очертания прирусловых отмелей в 2002 г.; 5 – береговая линия в 2002 г. Также отмечено положение дамбы, ограждающей затон СРСЗ (судоремонтно-судостроительного завода).

ГЛАВА 5. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ МОРФОДИНАМИКИ ОСТРОВОВ В ШИРОКОПОЙМЕННЫХ РУСЛАХ БОЛЬШИХ РЕК.

Многообразие размеров и форм островов, как основных элементов русловых (островных) разветвлений, в наиболее полной мере проявляется в свободных условиях развития русловых деформаций, где они составляют основной уровень разветвленности, определяющий русловый режим и морфологический облик многорукавных русел. В широкопойменных руслах, когда ширина поймы $B_{\text{п}} > 2 \div 3b_{\text{р}}$ (ширины русла), практически все острова являются аккумулятивными аллювиальными образованиями, активно перестраиваемыми и изменяющимися по мере своей эволюции.

Для больших и крупнейших рек, к которым относятся верхняя Обь, средняя и нижняя Лена разнообразие разветвлений и создающих их островов, максимально. Вне зависимости от типа разветвления можно выделить основные этапы (стадии) развития островов, отражающие не только их морфологические и морфометрические особенности, но и связь с такими важными характеристиками самого русла, как степень его устойчивости (L , K_c), степень разветвленности (n_0/x), а также основные особенности динамики островов (регрессивное, трансгрессивное смещение или относительно стабильное положение в русле). Последние вместе с учетом рассредоточения стока по рукавам чрезвычайно важно для решения задач управления русловыми процессами при хозяйственном освоении рек.

Анализ разветвлений позволяет выявить и обобщить характеристики островов на разных стадиях развития, на верхней Оби, средней и нижней Лене, встречающихся как в виде отдельных звеньев, так и в виде морфологически однородных протяженных участков разветвленного русла (табл. 5.1).

Таблица 5.1 — Морфометрические характеристики островов и их классификация (верхняя Обь, средняя и нижняя Лена).

Типы островов	Река	Параметры островов (средние значения)				Степень разветвленности
		Длина L_0 , м	Ширина B_0 , м	L_0/B_0	Уравнение связи $B_0 = kL_0 + b$	
Элементарные	верхняя Обь	110-800	35-200	3,75-5,1	$B_0 = 0,19L_0 - 0,5$	1,2-6,6
	средняя Лена	300-2100	120-900	2,1-4,9	$B_0 = 0,257 L_0 + 75,5$	2,8-4,6
	нижняя Лена				$B_0 = 0,16 L_0 + 45$	

Малые	верхняя Обь	150-1000	80-360	3,1-4,9	$B_o = 0,22 L_o + 33,5$	1,3-3,9
	Лена	450-3200	300-1450	3,4-4,6	$B_o = 0,382 L_o + 190,1$	1,4-4,0
Средние	верхняя Обь	500-1500	150-650	2,3-4,0	$B_o = 0,31 L_o + 81,7$	2,4-3,2
	Лена	1450-6200	400-1900	3,2-5,7	$B_o = 0,302 L_o + 204,6$	0,9-3,0
Большие	верхняя Обь	700-4800	250-2100	2,2-4,4	$B_o = 0,24 L_o + 122,1$	0,5-2,7
	Лена	1200-8500	550-3300	2,2-3,9	$B_o = 0,266 L_o + 68,3$	1,5-2,2
Островные массивы	верхняя Обь	1300-6950	600-1950	2,4-3,5	$B_o = 0,32 L_o + 85,9$	1,0-1,3
	Лена	2600-9800	800-2900	2,2-3,3 (min – 1,8)	$B_o = 0,52 L_o - 604,2$	0,3-1,0

* - Параметры элементарных островов различаются для участков средней и нижней Лены

Классификация островов представляет собой эволюционный ряд островов, находящийся в тесной связи с их морфометрическими параметрами, в котором каждый последующий тип характеризуется увеличением линейных размеров, как на Оби, так и на Лене; соответственно изменяется и степень разветвленности их русел (табл. 5.2). Вне зависимости от размеров реки, абсолютные значения n_o/x уменьшаются по мере увеличения размеров островов. При этом по типам разветвлений осредненные значения n_o/x на верхней Оби распределяются следующим образом: параллельно-рукавные – 3,56 (макс. до 6,6) что является максимальным значением; в одиночных, односторонних и чередующихся односторонних разветвлениях она снижается до 2,7, 1,7 и 1,6 соответственно, повышаясь в узлах слияния рек до 2,14. На средней Лене наблюдается аналогичная зависимость с поправкой на размер реки. В нехарактерном для обеих рек, но единственном на Лене ниже устья Алдана Белогорском пойменно-русловом разветвлении значение n_o/x невелико и составляет 0,78. Такое столь небольшое значение степени разветвленности обусловлено тем, что несмотря на большое количество островов, образующих Белогорское разветвление, их линейные размеры достаточно велики, и больше половины от их общего количества относятся, в соответствии с классификацией, к средним и большим островам. На нижней Лене, аналогично, несмотря на значительную разветвленность, абсолютный показатель по сравнению с другими участками невелик: для

преобладающих здесь параллельно-рукавных разветвлений он составляет 0,95 и лишь с учетом разветвлений в рукавах 2-го порядка повышается до 1,23, что связано в первую очередь с большими размерами самого русла и сформированных в нем островов.

Таблица 5.2 — Степень разветвленности русла на верхней Оби, средней и нижней Лене при разных морфодинамических типах русла

Морфодинамический тип разветвленного русла	Степень разветвленности n_0/x		
	верхняя Обь	Лена	
		средняя	нижняя
Одиночные	2,7	1,7	—
Сложные одиночные	2,9	1,54	—
Односторонние	1,7	1,15	—
Чередующиеся односторонние	1,6	1,06	—
Параллельно- рукавные	3,56 (макс. 6,6)	1,93	0,95
<i>То же с учетом разветвлений 2-го порядка</i>	—	—	1,23
Дельтовые (в узлах слияния рек)	2,14	1,26	—
Пойменно-русловые	—	0,78	—

Первый тип – *элементарные острова*, формирующиеся непосредственно при зарастании осередков, сохраняющие их форму и размеры (на верхней Оби их длина и ширина изменяется от нескольких десятков до сотен метров, на средней Лене – до 1–2 км при ширине русла, соответственно, до 2,5 и 7–9 км). На данной стадии развития образовавшийся элементарный остров уже оказывает влияние на структуру потока, способствуя его разделению во все фазы водного режима и накоплению на поверхности взвешенных наносов, в том числе органических, являющихся субстратом для растительности, развитие которой способствует еще большему закреплению формирующегося острова и увеличению его относительной высоты. Вследствие этого элементарный остров при сохранении своих линейных размеров быстро растет в высоту, соответствуя уровню низкой, а в отдельных случаях и средней поймы. Элементарные

острова, при благоприятных условиях, с одной стороны, могут образовываться во всех типах русла, обеспечивая трансформацию прямолинейного русла в разветвленное, а с другой, именно они чаще всего образуют разветвления 2-го и 3-го порядков в основных рукавах или наиболее сложные параллельно-рукавные разветвления. Преимущественно за счет элементарных островов возрастает степень разветвленности русла, а их параметры чаще всего образуют отличающиеся от остальных типов гидролого-морфологические зависимости разветвлений.

Элементарные острова вследствие русловых переформирований либо быстро (в течение 15-20 лет) объединяются или нарастают благодаря зарастанию причленившихся к ним отмелей и кос, создавая малые, а затем уже при их объединении – средние и большие острова, которые сохраняют оптимальное соотношение $L_o/B_o = 3-4$ или, наоборот, подвергаясь частичному размыву при одновременном причленении к ним с оголовка и в рукавах побочной и кос, приобретают удлиненную ($L_o/B_o \gg 5$) форму, достигая максимальных значений $L_o/B_o = 6,2-6,9$. Кроме того, параметры разветвлений, в которых преобладают элементарные острова, как правило, в несколько раз меньше, чем параметры разветвлений, образованных другими типами.

Несколько элементарных островов (как правило, не больше 2-3) объединяясь, формируют *малые острова* – также один из самых многочисленных типов по количеству формируемых ими разветвлений. Преобладающие их размеры на больших реках – сотни метров (реже 1-3 км) в длину и 200-300 м в ширину при средней суммарной ширине русла вместе с островами – 3-5 км. Однако при увеличении ширины русла и водности реки их длина достигает 3-4 км, ширина – 1-1,5 км (о-ва Рысий, Митька-Беляга на Лене ниже устья р. Вилюя).

Малые острова часто образуют как одиночные и сложные одиночные разветвления, так и встречаются в виде групп («архипелагов»), и цепочек в центральной части русла. В последнем случае они аналогично элементарным являются основой для формирования параллельно-рукавных разветвлений.

Следующая стадия развития островов, а соответственно и их тип – *средние острова*, образующиеся как несколькими объединившимися малыми или крупными элементарными, так и вследствие причленения к ним побочной со стороны рукавов, у оголовка или кос в ухвостьях при частичном, обычно с оголовков, размыве. Их размеры сопоставимы с размерами русла: на верхней Оби и средней Лене – 3-7 км в длину и 1-1,5, реже – 2 км в ширину при суммарной ширине русла соответственно 3-4 и 7-8 км. По мере увеличения водности и ширины русла изменяется форма таких островов, она становится более изометричной, однако большая их часть имеет соотношение $L_o/B_o = 3-4$, таким

образом сохраняя свою гидравлическую выгодность по отношению к потоку [Комар, 1983; Baker, 1977]. Средними часто являются центральные острова в основных звеньях сопряженных разветвлений, а также в прибрежных периферических частях русла. В этом случае они формируют прибрежные (односторонние и чередующиеся односторонние) разветвления. Размеры средних островов уже достаточны для искривления динамических осей потока в рукавах слева и справа от них и формирования в этих рукавах сегментных излучин различной степени развитости (пологие, развитые, крутые).

Большие острова, представляют собой несколько объединившихся малых и средних при обсыхании и зарастании разделяющих их рукавов и проток, а также вследствие причленения и превращения в пойму побочной как ко всему острову, так и его составляющим. Бывшие рукава и протоки, разделяющие составляющие их малые и средние острова, проявляются в виде ложбин в рельефе острова, нередко занятых озерами характерной вытянутой формы. Большие острова являются наиболее крупными формами в русловых разветвлениях, квазистабильными образованиями, подверженными лишь частичным переформированиям в течение многих десятилетий и даже столетий, причем сезонные переформирования не оказывают на них существенного влияния. Деформации затрагивают острова такого типа лишь при полной перестройке русла, связанной с существенным перераспределением водности основных рукавов или сменой морфодинамического типа русла. В таком случае, они существенно отличаются по своим параметрам от островов, характерных для нового морфодинамического типа русла (например, о. Пономарев в Якутском «разбое», имеет длину около 5,5 км, при средней для участка 1,5-2,5 км; таким образом, этот остров – реликт бывшего здесь сопряженного разветвления). Большие острова часто располагаются вне зоны активных русловых деформаций, но иногда встречаются и посередине реки, образуя одиночные, отдельные звенья сопряженных и параллельно-рукавных разветвлений (последние – на крупнейших реках со слабоустойчивым или неустойчивым руслом, широко распространенные, например, на нижней Лене ниже устья Вилюя). Линейные размеры таких островов достигают на средней Лене 3-5 км в ширину при длине до 10-12 км, являясь предельными параметрами для этого типа разветвлений. В периферических частях русла такие острова подвержены еще большему укрупнению и росту в ширину, и в подавляющем большинстве случаев это – заключительная стадия развития острова.

Дальнейшие переформирования разветвлений приводят к образованию **островных массивов** сложной конфигурации и характеризующихся размерами, превосходящими ширину русла (длина и ширина таких массивов может достигать на Лене 12-15 и более километров), создавая при этом уже более высокий уровень разветвленности (пойменно-

русловой). Оценка ширины островных массивов несколько затруднена, поскольку они имеют крайне сложную форму, в которой не угадываются первоначальные очертания острова, кардинально измененного деформацией русел многочисленных рукавов. В наиболее широких частях B_0 часто достигает 5-7 км. В связанных с островными массивами пойменно-русловых разветвлениях, каждый рукав имеет свой собственный морфодинамический тип русла, представленный несколькими излучинами, русловыми разветвлениями и прямолинейными, неразветвленными участками или их сложным чередованием по длине рукавов. Трансформации больших островов в островные массивы способствует направленное горизонтальное смещение русла, при этом в рукаве между береговой поймой и островным массивом доля стока всегда невелика (от 1 до 10%), зачастую он превращается в маловодное пойменное ответвление и формируется пойменная многорукавность.

Причины переформирования разветвлений и деформации островов при разных морфодинамических типах русла.

Переформирования разветвлений, связанные с изменением количества и линейных размеров островов, их укрупнением или наоборот, размывом, усложнением или упрощением морфологической структуры русла могут происходить под влиянием естественных и антропогенных факторов. Естественные причины связаны с саморазвитием форм русла и островов и гидроклиматическими колебаниями, которые приводят к изменению водности реки, стока наносов, условий прохождения руслоформирующих расходов воды. На это накладывается влияние местных условий, например, особенностей прохождения ледохода, формирование заторов, приводящих к перераспределению стока по рукавам, непосредственное механическое воздействие льда на русло, разрушение берегов.

Одной из важнейших естественных причин, приведших к трансформации разветвлений и, как следствие, переформированию островов на средней и нижней Лене является климатически вызванное повышение среднегодового стока реки и других гидрологических характеристик [Магрицкий, 2015], установленное на основе анализа многолетних рядов наблюдений за стоком воды и наносов, температурой воды, а также с помощью данных о температуре воздуха и осадках на метеостанциях, расположенных в бассейне Лены. Было установлено, что несмотря на обширную территорию бассейна и различные физико-географические условия, наблюдается направленное увеличение значения среднегодовой температуры воздуха, а также (частично) увеличение количества осадков. Полученные выводы свидетельствуют об увеличении стока воды во все сезоны и фазы гидрологического режима и о существенном (с 1988 г.) росте стока наносов и

теплоты. Особенно увеличился сток наносов в летне-осенний период (период открытого русла), когда интенсивность русловых переформирований максимальна.

Антропогенные факторы интенсивнее всего проявляются на участках рек, наиболее освоенных в водохозяйственном и водотранспортном отношении. К ним относятся: непосредственное изменение формы русла и руслового рельефа путем разработки дноуглубительных прорезей, разработка карьеров аллювиальных стройматериалов в руслах и на пойме, искусственное спрямление излучин, создание водохранилищ, возведение мостовых и подводных переходов через реки, берегоукрепление и т.д. Кроме того, антропогенное вмешательство может быть косвенным, например, распашка земель и вырубка лесов приводит к изменениям основных показателей стока воды и наносов с площади водосборного бассейна реки. Антропогенное воздействие на русла, в том числе, Оби и Лены, как правило, должно проводиться с учетом закономерностей их руслового режима, что способствует не только решению текущих задач эксплуатации русел рек, но и поддержанию оптимальных условий для их стабилизации и снижения вероятности развития опасных проявлений русловых процессов. Однако, даже при регулярном и грамотном антропогенном вмешательстве, влияние природных факторов очень велико.

Совокупное воздействие природных и антропогенных факторов усиливается сложной конфигурацией самих разветвлений, большим их разнообразием, низкой устойчивостью русла, а также взаимосвязью узлов разветвлений, когда переформирования нижележащего во многом обусловлено изменениями, происходящими в вышележащем. Именно эти факторы являются основными при анализе морфодинамических типов разветвлений и их смены, активно происходящей в последнее время как, например, в Якутском «разбое» на Лене, в Фоминском разветвлении на Оби и др.

Наиболее активно в последнее время на больших и крупнейших реках со слабоустойчивым или неустойчивым руслом происходит формирование параллельно-рукавных разветвлений, в которые трансформируются другие типы разветвлений (сопряженные, сложные сопряженные, односторонние и пр.). Например, на средней Лене в XX в. произошла смена сопряженных разветвлений от г. Покровска до Кангаласского Камня на параллельно-рукавные, образовавшая два морфологически однородных участка – «разбой» Рассолода и Якутский, причем этот процесс, начавшийся еще в 1940-е гг., наиболее активно протекал в 1970-80-е гг. и завершился только к началу XXI века, а на отдельных участках еще не до конца. Это видно при анализе распределения скоростей течения потока в разбое Рассолода (рис. 5.1). Здесь в меженный период правая ветвь потока менее выражена, более развит рукав вдоль левобережных островных массивов. То же самое наблюдалось в Якутском «разбое», в котором образование параллельно-

рукавного разветвления в Бестяхском рукаве произошло лишь через 50-60 лет после того, как в него переместился основной (80-90 %) сток реки.

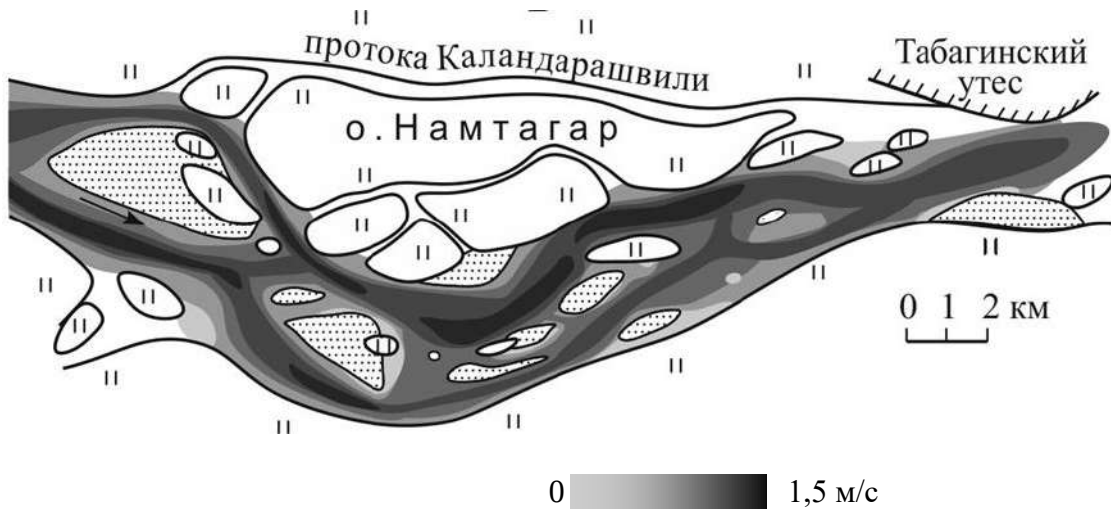


Рисунок 5.1 — Скоростное поле потока в «разбое» Рассолода средней Лены (по данным измерений 2019 г.) [Чалов, Беркович и др., 2020].

Столь продолжительный период смены типов русла обусловлен, прежде всего, наличием в русле многолетней мерзлоты, которая «цементируя» мелководья и прирусловые отмели, препятствует размыву и смещению прирусловых отмелей, побочней, и тем более островов. Лишь упомянутое возрастание теплового стока и направленная деградация мерзлоты в конце XX века способствовали оттаиванию и последующему размыву и отторжению побочней и развитию рукава вдоль второй ветви течения. Острова, составлявшие ранее основу звеньев сопряженных разветвлений, оказались в зоне активных русловых переформирований и благодаря перераспределению стока и возрастанию водности бывших второстепенных протоков располагаются в настоящее время в центральной части русла.

В вышерасположенном «разбое» Рассолода превращение бывшей маловодной межостровной протоки в полноценный рукав привело к смещению в центральную часть русла о. Ляля ($L_o = 2350$ м, $B_o = 790$ м), располагавшегося ранее в периферической части русла. В целом большинству островов здесь свойственно трансгрессивное смещение, причем наносы, поступающие вследствие размыва оголовков, поступают в рукава, формируя в них побочни и косы в ухвостье. Например, размыв островов у левого берега на повороте стрежня потока к правому берегу (к «Бестяхской» террасе) привел к формированию ниже по течению на заходе в левый рукав у о. Пономарев (Адамовская протока) массивного побочня, частично перекрывающего ее исток. Одновременно с этим головок о. Пономарев подвержен интенсивному размыву (до 20 м/год), сама отмель при этом смещается со скоростью до 100 м/год [Чалов, Беркович и др., 2020]. Большая ширина

правого рукава (Буорыларской протоки) способствует формированию здесь разветвления 2-го порядка о-вом Сахалин ($L_0 = 2350$ м, $B_0 = 790$ м). Со временем продолжающееся сокращение водности Адамовской протоки и развитие Буорыларской приведет к перестройке части параллельно-рукавного разветвления и смещению двухстречневой динамической оси потока вправо. При этом центральным островом в этой системе может стать о. Сахалин, а правая ветвь течения пройдет по бывшим побочным протокам, отделяющим в настоящее время зарастающую правобережную отмель от берега.

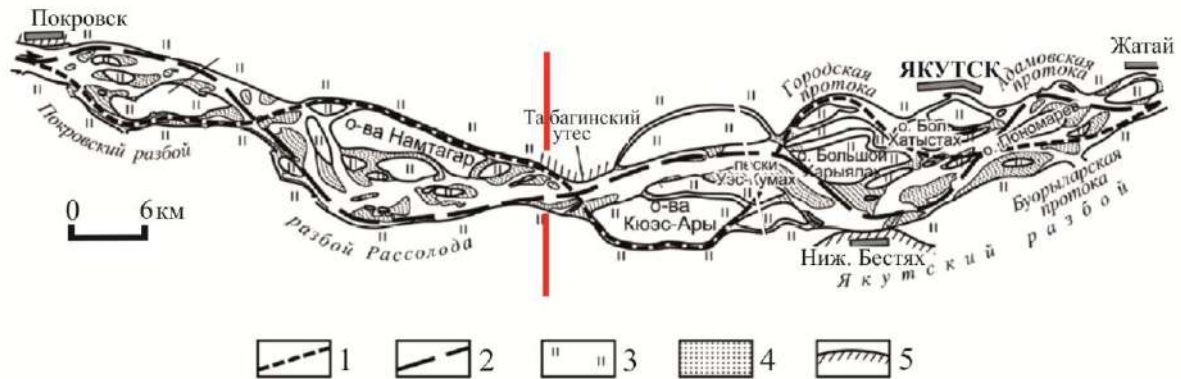


Рисунок 5.2 — Переформирования сопряженных разветвлений р. Лены на участке г. Покровск – п. Жатай в XIX – середине XX вв. Оси основных рукавов и ветвей потока: 1 – XIX- начало XX вв.; 2 – середина XX в.; 3 – пойма; 4 – прирусловые отмели, осередки; 6 – коренные берега. Красной линией обозначена граница Покровского и Якутского узлов.

Трансформация сопряженных и чередующихся односторонних разветвлений в параллельно-рукавные затронула и участок средней Лены ниже Кангаласского Камня. Начавшееся разделение русла на две ветви течения (одной из которых стала прежде маловодная прибрежная Буденновская протока) с приблизительно равными расходами воды непосредственно ниже мыса распространяется вниз по течению, охватывая новые участки. Возрастанию доли и усложнению структуры параллельно-рукавных разветвлений способствует увеличившееся время обсыхания отмелей в межень и их активное зарастание, что приводит к увеличению количества молодых элементарных островов, а значит и к возрастанию степени разветвленности в целом.

Переформирование островов и разветвлений на верхней Оби происходит на фоне слабого врезания русла и под влиянием слияния двух приблизительно равных по водности, но на порядок различающихся по мутности рек Бии и Катунь. Образование преобладающего в настоящее время параллельно-рукавного русла здесь началось еще в первой половине XX века, когда сформировался верхний по течению Одинцовско-Фоминский узел. До этого времени здесь было распространено относительно

прямолинейное, неразветвленное русло, прерываемое лишь односторонним разветвлением с рукавом, проходящим вдоль правого берега на Усть-Ануйском участке. Тенденция к сокращению водности и постепенному отмиранию правого рукава здесь началась еще на рубеже XIX–XX вв. Доля стока в нем к 1962 г. составляла 10% [Беркович, Гаррисон и др., 1990], а к началу XXI в. сократилась до 3-5%. Следующие два узла (Усть-Ануйский и Дмитриевский) сформировались к началу 60-х гг., а к середине 80-х гг. – Акутихинский, заменив существовавшие чередующиеся односторонние разветвления [Русловые процессы..., 1996]. Таким образом, параллельно-рукавное русло распространилось на расстояние более 65 км от слияния и в настоящее время на стадии трансформации находится участок ниже п. Быстрый Исток. При этом большие острова, формирующие ранее чередующиеся односторонние разветвления слабо подвержены деформациям, сохраняют свое стабильное положение, а вдоль правого берега ниже устья р. Ануя они трансформировались в островные массивы неправильной формы с $L_0 \approx 5-7$ км, что является наибольшим значением для верхней Оби. Образованию новых элементарных островов небольших размеров ($L_0 = 150-300$ м) способствует изменение формы транспорта наносов, которые, по сравнению с Бией и Катунью, попадая в основную реку, становятся влекомыми и в условиях неустойчивости русла образуют многочисленные осередки – основу будущих элементарных и малых островов. Еще одним фактором интенсивного поступления наносов является замедление продвижения вниз по течению дельтового разветвления в устье Бии и Катунь. Дальнейшее его смещение невозможно, поскольку оно достигло створа сужения русла коренными бортами долины у с. Одинцово, вследствие чего выносимые притоками наносы стали транзитом поступать уже в русло Оби ниже по течению, способствуя его трансформации.

Если естественно обусловленные трансформации происходят в течение достаточно длительного времени (в зависимости от реки и масштаба проявления от первых десятков до 80-90 и более лет как на средней и нижней Лене), то антропогенные воздействия существенно ускоряют перестройку русла. Разработка дноуглубительных прорезей, строительство дамб, перекрывающих рукава и протоки при правильном (учитывающем русловой режим реки) проектировании приводит к стабилизации русла в оптимальном положении с точки зрения естественной гидроэкологической безопасности и уменьшению темпов русловых деформаций. Перекрытие дамбами левых рукавов в «дельте» Катунь вместе с интенсивными дноуглубительными работами привело к повышению устойчивости Фоминского узла разветвления, который, по сути, в настоящее время стал функционировать как одиночное разветвление, с более развитым правым рукавом, в то время как левый выполняет наносоотсасывающую роль, а во время межени его истоки

перекрываются обширными побочными. В это же время на нижележащем участке в бывшем левом основном рукаве сформировалась новая ветвь параллельно-рукавных разветвлений. Ниже устья Ануя, наоборот, перекрытие дамбой левых рукавов привело к формированию одностороннего разветвления (Дмитриевский узел), где вдоль левого берега протягивается группа островов, отделенных от берега маловодными протоками. Ниже по течению, капитальные работы по выправлению русла не осуществлялись, сохраняются ненарушенные параллельно-рукавные разветвления, но вследствие поступления сюда наносов, проходящих верхние узлы транзитом, падает степень устойчивости и увеличивается количество островов (степень разветвленности n_0/x в Акутихинском узле по сравнению с другими возрастает почти в 2 раза до средних значений $n_0/x = 3,3 - 4,0$).

Проанализировать основные направления трансформации русла и динамики островов можно и по изменению соотношения водности рукавов при ее сезонных и многолетних колебаниях. Отдельные этапы переформирования отвечают определенной картине рассредоточения стока и зачастую обусловлены ей. Таковыми являются особенности динамики островов и участков разветвлений на нижней Лене ниже устья Вилюя. В целом для данного участка характерна слабая изменчивость облика русла в многолетнем плане, и переформирования касались в основном разветвлений второго порядка, которые расположены в правом основном рукаве. В Черпальском звене они образованы о-вами Митька-Беляга и Рысий. Они расположены на перевале потока, огибающего группу прибрежных островов к правому коренному берегу. Между тремя протоками возле этих островов в многолетнем плане происходит периодическое перераспределение стока (и изменяется трасса судового хода) и, соответственно, периодическое их развитие.

Значительная часть больших островов сохраняют свое положение в русле, причем это касается как островов в активной части русла, образующих центральное «ядро» узла разветвления, так и островов в периферических частях, которые особенно распространены вдоль левого пойменного берега. Регрессивный рост происходит при возникновении зон замедления течения перед островами, разделенными маловодными протоками, за выступами («плечами») берега, а также в левобережных рукавах, где насыщенность потока наносами максимальная (за счет поступления наносов из Вилюя выше по течению). Иными словами, в зависимости от местных условий и расположения в русле, а также роли в рассредоточении стока, в одном и том же разветвлении при одинаковом морфодинамическом типе русла острова характеризуются различными стадиями эволюции и особенностями динамики.

Аналогичная ситуация складывается и в нижележащем разветвлении Сахам, которое по своим морфометрическим параметрам хотя и не превосходит Черпальское, но морфологически является его продолжением. Здесь также встречаются острова разных типов: от элементарных и малых, создающих основную массу разветвлений, до больших (о. Сахам и практически причленившийся к нему о. Батык-Ары с параметрами $L_0 = 5900\text{м}$, $B_0 = 3200\text{ м}$). В правой (более водной) ветви течения происходит перераспределение расходов воды по рукавам разветвлений второго порядка, смещение и продвижение на заходы в рукава побочней, которые на фоне сезонных и многолетних колебаний стока реки, как и в Черпальском разветвлении, приводят к периодическому изменению положения динамической оси потока (и трассы судового хода) и такой же периодичности в активизации диагонального рукава, расположенного у о. Сахам. Роль других межостровных протоков при этом минимальная, они либо крайне маловодны, либо расположены параллельно основным рукавам, возвращая часть стока в тот же рукав.

Таким образом, причины русловых переформирований можно разделить на три группы: естественные, связанные с эволюцией форм русел, смещением побочней и осередков и т.д.; естественные, обусловленные изменениями факторов стока воды и наносов (климатические изменения, влияние многолетней мерзлоты, притоков, чередование многоводных и маловодных периодов на реках); антропогенные. Причем первая группа является наиболее изученной и освещенной в литературе.

При прочих равных условиях одним из ключевых значений для эволюции и динамики островов при всех морфодинамических типах русла является его положение в русле (в центральной или периферической частях), в основных или второстепенных рукавах и т.д. На средней и нижней Лене большое разнообразие морфодинамических типов русла, их сложность и высокая степень разветвленности в этом отношении позволяет выделить основные характеристики и особенности динамики островов (табл. 5.3).

Таблица 5.3 — Распространение островов разных типов на средней и нижней Лене в зависимости от их положения в рукавах разветвленного русла при характерных морфодинамических типах разветвленного русла.

Положение острова в рукавах	Среднее значение L_0/B_0	Уравнение связи между $L_0 \sim B_0$	Особенности динамики	Преобладающий тип островов (стадия развития)
-----------------------------	----------------------------	--------------------------------------	----------------------	--

<i>В активной части русла основных рукавов</i>	3 – 4,5	$B_0 = 0,266L_0 + 68,3$	Трансгрессивное смещение, размыв островов с оголовка, аккумуляция и рост кос в ухвостье. Увеличение ширины островов за счет причленения побочней	Элементарные и малые острова в неустойчивом русле, средние и большие острова в более устойчивом русле (в одиночных, пар.-рук. и односторонних разветвлениях)
<i>В периферической части русла основных рукавов</i>	2,5-4,1	$B_0 = 0,3L_0 + 244,5$	Либо стабильное положение либо укрупнение (главным образом за счет возрастания ширины) путем отмирания межостровных протоков, причленения побочней, кос	Средние и большие при всех морфодинамических типах русла
<i>В активной части второстепенных рукавов</i>	3,0-5,2	$B_0 = 0,382L_0 + 190,1$	Трансгрессивное (при этом темпы меньше чем в основных рукавах)	Малые и средние. Размеры обусловлены шириной и водностью второстепенного рукава, увеличиваясь по мере возрастания последних.
<i>В разветвлениях 2-го и 3-го порядков</i>	3,5-6,2	$B_0 = 0,15L_0 + 44$	Преимущественно трансгрессивное смещение, возникновение новых островов, усложнение морфологии русла	Элементарные и малые острова, реже - средние (при большой ширине рукава в параллельно-рукавных разветвлениях)

<i>Островные массивы (заключительная стадия развития в руслowych разветвлениях)</i>	1,8 – 3,2	$B_0 = 0,52L_0 - 604,2$	Преимущественно стабильное положение, частичный размыв, приобретение сложных очертаний береговой линии, утрата первоначальной (оптимальной) формы острова	Островные массивы
---	-----------	-------------------------	---	----------------------

Выделенные типы островов во многом подтверждают результаты гидролого-морфологического анализа, согласно которым элементарные и малые острова характерны для параллельно-рукавных разветвлений при относительно низкой степени устойчивости русла. Напротив, большие острова формируются и стабильно существуют в более устойчивых односторонних и чередующихся односторонних разветвлениях. В случае если произошла перестройка русла в сторону усложнения его морфологии и увеличения степени разветвленности, то большие острова могут сохраняться в периферических частях русла, где они либо продолжают увеличиваться в размерах, либо превращаются в островные массивы (острова Бол. Хатыстах и Мал. Хатыстах в Якутском «разбое»). Однако в этом случае они не оказывают заметного влияния на динамику основного русла и общее рассредоточение стока.

Малые, средние, иногда большие острова, располагаясь в центральной части русла формируют одиночные (в т.ч. сложные одиночные) разветвления. Они имеют гидравлически оптимальную форму, подвержены трансгрессивному смещению и в случае объединения с другими островами увеличиваются в размерах, способствуя стабилизации разветвления. В определенных условиях (существенное различие в водности основных рукавов) происходит рост островов в ширину и, соответственно, приобретение ими более изометричной формы.

Острова в разветвлениях 2-го порядка, редко достигают размеров средних и тем более больших. Они, усложняя морфологию разветвлений и повышая степень разветвленности, зачастую обладают более вытянутой формой (о. Малый в разветвлении Сахам - $L_0/B_0 > 4,7$) по сравнению с островами, формирующими основное разветвление. В случае если они формируются в основном по водности рукаве, они размываются с

оголовков (рис. 5.3, А); наоборот, во второстепенных рукавах их количество возрастает, они быстро объединяются друг с другом (рис. 5.3, Б).

Можно предполагать, что формирование разветвлений 2-го порядка в параллельно-рукавных руслах может приводить в дальнейшем к перестройке последних. В таком случае, острова 2-го порядка в одном из рукавов образуют цепочку в его середине и выполняют роль нового разделителя потока на ветви течения. Другой же (как правило, несколько менее водный) рукав будет постепенно уменьшать свою водность, произойдет общее смещение двухстречневого потока в сторону более водного рукава. Такая ситуация может произойти в Якутском «разбое», в случае обмеления и превращения во второстепенную Адамовской протоки и развития рукава за о. Сахалин в Буорыларской протоке.

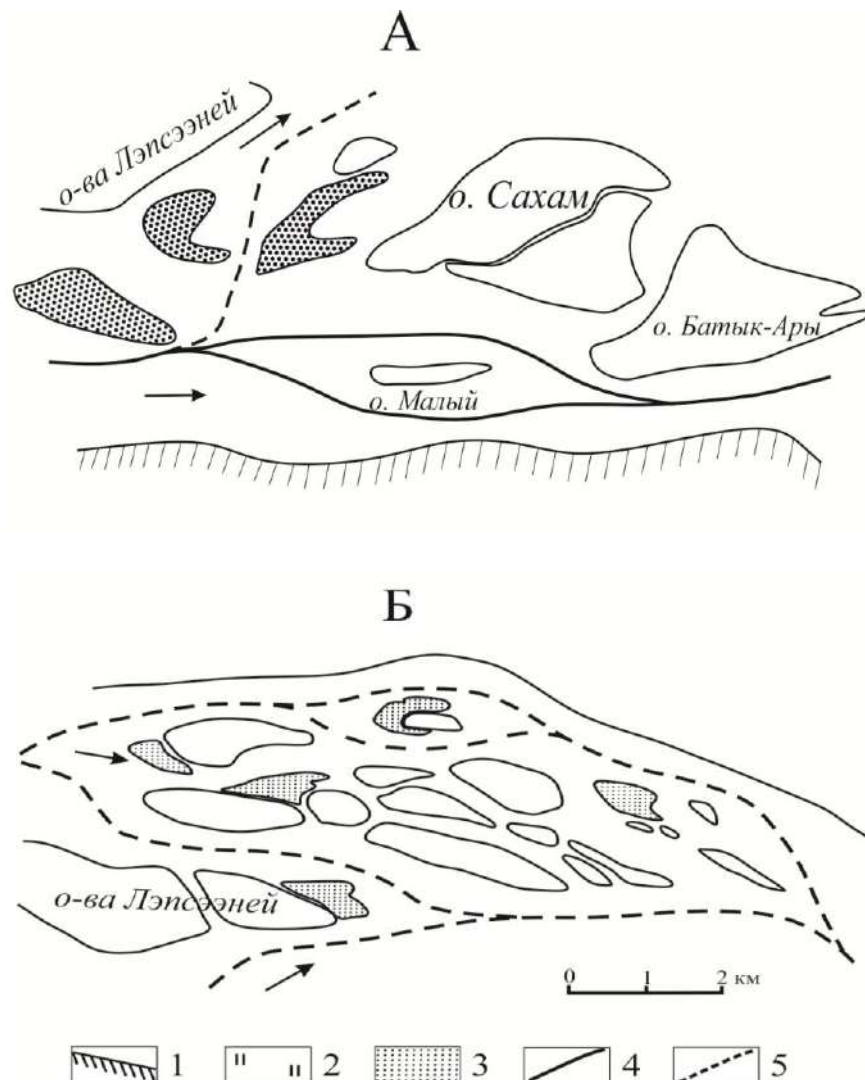


Рисунок 5.3 — Схема разветвлений второго порядка на участке параллельно-рукавного русла нижней Лены (1105-1095 км) в правом основном (А) и левом (Б) рукавах. 1 – коренной правый берег; 2 – пойма; 3 – прирусловые отмели; 4 – положение стречневых зон потока в правом основном рукаве; 5 – положение стречневых зон потока в левом менее водном рукаве и в квазипоперечных рукавах.

Таким образом, по мере усложнения структуры разветвлений, разнообразие типов образующих их островов возрастает в направлении от относительно простых одиночных и односторонних до сложных сопряженных и параллельно-рукавных, зачастую осложненных разветвлениями 2-го порядка. Особенности динамики островов находятся в более сложной связи с морфодинамическими типами и определяются в основном положением островов относительно динамической оси (осей) потока и местными условиями (поступление наносов, конуса выноса притоков, мысы коренных берегов). Соотношение L_o/B_o изменяется в зависимости от размеров и положения островов от меньшего к большему в следующем направлении: *островные массивы → большие острова в периферической части русла → большие острова в активной части русла → малые и средние острова → элементарные острова в основном русле → элементарные острова в разветвлениях 2-го порядка.*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Свободные условия развития русловых деформаций определяют на больших и крупнейших реках высокую интенсивность русловых переформирований, многообразие морфодинамических типов разветвлений, морфометрических и морфологических характеристик их основных элементов – островов, являющихся аккумулятивными аллювиальными образованиями.

1. Сравнительный анализ разветвлений и образующих их островов в неустойчивых и слабоустойчивых руслах, выполненный с учетом основных факторов и условий формирования русел верхней Оби и средней и нижней Лены, показал, что при существенном различии размеров рек формируются русла одних и тех же морфодинамических типов, но отличающиеся по морфометрическим характеристикам.

2. Определены основные морфодинамические типы русла для исследуемых участков; разветвленные русла абсолютно преобладают на верхней Оби, средней и нижней Лене, где они представлены практически всеми известными типами русловых (островных) разветвлений: от простых одиночных до наиболее сложных – параллельно-рукавных, на долю которых приходится бóльшая часть длины обеих участков (до 50% от суммарной длины всех разветвлений). На средней и нижней Лене встречаются короткие участки относительно прямолинейного неразветвленного русла, обусловленные геолого-геоморфологическим строением долины реки.

3. На основе гидролого-морфологических зависимостей, полученных для двух участков рек установлено, что степень разветвленности русла n_0/x зависит от суммарной ширины русла и его водоносности, причем на верхней Оби по мере удаления от слияния Бии и Катунь (вниз по течению) показатель n_0/x уменьшается, тогда как на средней и нижней Лене ширина русла, количество островов и n_0/x возрастают по мере роста водности реки (более чем в 2 раза в нижней части участка). Последнее связано с преобладанием самых сложных параллельно-рукавных разветвлений, которые по мере увеличения стока усложняют свое морфологическое строение.

4. В результате анализа линейных размеров, формы, количества и положения островов в русле, а также выявленных особенностей их динамики, для сложноразветвленных неустойчивых и слабо устойчивых русел можно наметить следующую последовательность развития островов и их классификацию по этому признаку: *осередок (как основа возможного формирования острова) → элементарный остров → малый остров → средний остров → большой остров → островной массив*. Последние являются конечной стадией в последовательном ряде русловых (островных)

разветвлений и в условиях прохождения руслоформирующих расходов при затопленной пойме могут создавать пойменно-русловые разветвления.

5. Как на Оби, так и на Лене морфометрические параметры островов, образующих разветвления, их расположение в русле и общее количество определяются устойчивостью русла и преобладающим морфодинамическим типом, что подтверждается гидролого-морфологическими зависимостями. Зависимость между показателями устойчивости русла и морфометрическими параметрами островов характерна для всех типов разветвлений и стадий развития островов – от зарастающих пионерной растительностью осередков до больших островов и крупных островных массивов.

6. Линейные размеры островов и их форма в плане зависят от морфодинамического типа русла, его устойчивости, а также положения островов в русле (в активной или периферической частях, образующих основные разветвления или разветвления 2-го порядка в главных и второстепенных рукавах). Параллельно-рукавным разветвлениям свойственно формирование элементарных и малых островов; руслам других типов – их объединение и формирование средних и больших островов, а в зонах устойчивой аккумуляции наносов в периферийных частях русла и в условиях бóльшей устойчивости – островных массивов. Степень устойчивости русла, его морфодинамический тип, стадии развития островов и их размеры определяют форму островов, выражающуюся соотношением их длины и ширины L_o/B_o , которое изменяется в широких пределах. Наименьшими значениями L_o/B_o обладают большие острова в периферических частях русла, расположенные вне зоны активных переформирований. Каплевидные острова, обладающие оптимальным соотношением $L_o/B_o = 3-4$, формируются в активных частях русла, имея небольшие размеры. Разброс величин L_o/B_o по длине реки отражает общую смену морфологической сложности русла, разнообразие его типов и стадий развития островов. Установлено, что при одинаковом морфодинамическом типе русла, несмотря на различия в линейных размерах, сохраняется характерный для данного типа русла коэффициент формы (исключение составляют элементарные острова на нижней Лене, отличаясь прежде всего от аналогичных в среднем течении более вытянутой формой).

7. Зависимости вида $L_o/B_o = f(J, K_c)$ и $n_o/x = f(J, K_c)$ для двух разных по водности и ширинам участков рек, приведенные к единой зависимости при помощи введения поправочного коэффициента на размер реки и ее водность (при условии, что $b_p \sim Q$), показали, что, несмотря на разницу в водности двух рек в 6,15 раза, связи имеют общий вид, различаясь по типам разветвления и разной устойчивости русла.

8. Выявлены общие закономерности образования и развития островов, переход от осередкового уровня разветвленности к русловому (островному) и последующая

трансформация типа от элементарного острова до островного массива, а также тенденции их размыва и объединения, условия их трансгрессивного и регрессивного смещения. Показано влияние естественных (увеличение водности, оттаивание многолетнемерзлых пород в русле) и антропогенных (выправительные работы, строительство дамб) факторов на деформации островов и разветвлений в целом, а также влияние трансформации морфодинамического типа русла на разветвления и их параметры.

9. Показано влияние сезонного и многолетнего перераспределения стока по рукавам разветвлений на переформирования островов и изменение положения динамической оси потока, приводящее к увеличению степени разветвленности русла благодаря активизации маловодных пойменных протоков, отчленению частей пойменных массивов, зарастанию осередков и превращению их в элементарные острова.

10. По мере усложнения структуры разветвлений, разнообразие образующих их типов островов возрастает в направлении от относительно простых одиночных и односторонних до сложных сопряженных и параллельно-рукавных, часто осложненных разветвлениями 2-го порядка. Соотношение L_0/B_0 изменяется при этом в зависимости от положения островов и их типа в направлении: *островные массивы* → *большие острова в периферической части русла* → *большие острова в активной части русла* → *малые и средние острова в активной части русла* → *элементарные острова в основном русле* → *элементарные острова в разветвлениях 2-го порядка*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алабян А.М. Типы русел равнинных рек и факторы их формирования // Геоморфология. – 1992. – № 4. – С. 37–40.
2. Алексеевский Н. И., Чалов С. Р., Чалов Р. С. Структурные уровни формирования и типизация разветвленных русел рек // Вестник Московского университета. Сер. 5, География. 2011. № 4. С. 8-15.
3. Алексеевский Н.И. Формирование и движение речных наносов. М.: МГУ. 1998. – 202 с.
4. Алексеевский Н.И., Чалов С.Р. Гидрологические функции разветвленного русла – М.: Географ. ф-т МГУ, 2009. – 240 с.
5. Алексеевский Н.И., Чалов С.Р. Структура русловых разветвлений // Геоморфология. 2004. № 3. С. 57–66.
6. Алтунин С.Т. Регулирование русел. М.: Сельхозиздат, 1962. 352 с.
7. Беркович К. М., Жуков Н. Г., Рулева С. Н., Суслов Е. А. Деформации русла Верхней Оби и проблемы улучшения условий судоходства // Исследования русловых процессов для практики народного хозяйства. М. 1983. С. 282 -283.
8. Беркович К. М., Зайцев А. А. Русловые процессы в узле слияния Бии и Катунь // Метеорология и гидрология. 1976. С. 82-85.
9. Беркович К.М. и др. Русловой режим и регулирование русла средней и нижней Лены // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 8. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1981. С 125-156.
10. Беркович К.М., Борсук О.А., Гаррисон Л.М., Кирик О.М., Лодина Р.В., Рулева С.Н., Чалов Р.С., Чернов А.В. Русловой режим и регулирование русла средней и нижней Лены // Эрозия почв и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ, 1981. Вып. 8. С. 125–156.
11. Беркович К.М., Векслер А.Б., Донненберг В.М., Маккавеев Н.И., Чалов Р.С. Формирование русла Оби в нижнем бьефе Новосибирской ГЭС// Труды ЗапСибИПИ Госкомгидромета.– 1981. – Вып. 52. – С. 3–20.
12. Беркович К.М., Гаррисон Л.М., Рулева С.Н., Сурков В.В., Чалов Р.С. Русловые процессы, антропогенные изменения Русла Нижней Катунь и их влияние на ландшафты поймы // Эрозия почв и русловые процессы. М.: Географ. ф-т МГУ. – 2000. Вып. 12. С. 130–157.

13. Беркович К.М., Гаррисон Л.М., Рулева С.Н., Чалов Р.С., Морфология русла и русловые деформации верхней и средней Оби // Земельные и водные ресурсы. Противозэрозийная защита и регулирование русел. – М.: Изд-во МГУ, 1990. С. 95-120.
14. Беркович К.М., Чалов Р.С., Чернов А.В. Экологическое русловедение. М.: ГЕОС, 2000. 332 с.
15. Борсук О.А., Лодина Р.В. Русловой аллювий на верхней и средней Лене // Эрозия почв и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ, 1974. Вып. 4. С. 149-154.
16. Борсук О.А., Чалов Р.С. О врезании русла р. Лены // Изв. ВГО. 1973. Т. 105, вып. 5. С. 452-456.
17. Броницкий В. И., Кирик О. М. Некоторые особенности русловых деформаций р.Лены в районе пос.Нижний Бестях // XVI пленарное межвузовское координационное совещание по проблемам эрозийных, русловых и устьевых процессов. СПб, 2001. С. 73–74.
18. Великанов М.А. Русловой процесс. М. Госфизматиздат, 1958. 395 с.
19. Водные пути бассейна Лены. – М.: МИКИС, 1995. – 600 с.
20. Водные ресурсы России и их использование. СПб.: ГТИ, 2008. 600 с.
21. Войнович П.А. К вопросу о распределении расхода по разветвлениям открытого русла // Изв. НИИ гидротехники. Т.V. Л., 1932. С. 73–105.
22. Геология СССР. Том XIV. Западная Сибирь (Алтайский край, Кемерово, Новосибирская, Омская, Томская области). М.: Недра, 1967. 698 с.
23. Голубцов Г.Б., Камышев А.А., Сахаров А.И., Чалов Р.С. Переформирования русла и управление русловыми процессами на затруднительных для судоходства перекатных участках сложноразветвленного русла нижней Лены. В сборнике: Водные пути и русловые процессы. Гидротехнические сооружения водных путей. Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. Под редакцией проф. Г.Л. Гладкова, К.П. Моргунова. Санкт-Петербург, 2021. С. 79-96.
24. Голубцов Г.Б., Чалов Р.С. Острова верхней Оби: морфометрическая характеристика, эволюция и динамика // Геоморфология. 2019. № 1. С. 80–90.
25. Голубцов Г.Б., Чалов Р.С. Сравнительный гидролого-морфологический анализ островов сложноразветвленных русел верхней Оби и средней Лены // Вест. Удмурт. ун-та. Сер. Биология. Науки о Земле. 2020. Т. 30. Вып. 2. С. 164–174.
26. Горохов А.И., Федоров А. Н. Современные тенденции изменения климата в Якутии // География и природные ресурсы. 2018. №2. С. 153-161.
27. Гришанин К.В. Теория руслового процесса. М.: Транспорт, 1972. 216 с.

28. Ермакова А.С., Кирик О.М. Морфология и переформирования русла на Усть-Алданском участке р. Лены // Геоморфология. 2006. №2.
29. Завадский А.С., Львовская Е.А., Рулева С.Н., Чалов Р.С. Морфодинамика русла р. Печоры (от г. Печоры до устья на фоне его характеристики по всей длине) // Эрозия почв и русловые процессы. М.: Географ. ф-т МГУ. – 2015. – Вып. 19. – С. 211–236.
30. Завадский А.С., Фингерт Е.А., Ботавин Д.В., Головлев П.П. Современные подходы к обоснованию генеральных схем коренного улучшения судоходных условий (на примере сложноразветвленного участка реки Лены) // Водные пути и русловые процессы. Гидротехнические сооружения водных путей. СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова. 2019. — С. 148–160.
31. Завадский А.С., Чалов Р.С. Гидролого-гидроморфологические характеристики свободных излучин на реках в различных природных условиях // Современная география и окружающая среда. Казань: изд-во Казан. ун-та. – 1996. – С. 73–74.
32. Зайков Б.Д. Очерки гидрологических исследований в России / Под ред. А. П. Доманицкого. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 325 с.
33. Зайцев А.А., Тананаев Н.И. многолетние переформирования сложноразветвленного русла р. Лены в районе "якутского разбоя" и влияние на них промерзания грунтов. Геоморфология. 2008 (1) С .25-35.
34. Знаменская Н.С. Донные наносы и русловые процессы. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 192 с.
35. Иванов В.В. Условия формирования, гидролого-морфометрические зависимости и деформации относительно прямолинейных, неразветвленных русел: автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.27. – М.: МГУ, 1989. – 23 с.
36. Кирик О. М., Чалов Р. С. О трансгрессивном и регрессивном смещении островов и островных массивов в разветвленных широкопойменных руслах. // Геоморфология. 2015. №2. С. 16-27.
37. Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Снищенко Б.Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 272 с.
38. Лелявский Н.С. О речных течениях и формировании речного русла // Труды 2-го съезда инженеров-гидротехников в 1893 г. СПб., 1893 (Вопросы гидротехники свободных рек. М.: Речиздат, 1948. С. 18-136).

39. Лодина Р.В. Руслообразующие наносы на реках Северной Евразии // Вест. Моск. Ун-та. Сер.5. География. 1993. №6 С.58-64.
40. Лодина Р.В. Региональные закономерности устойчивости русел рек России // Геоморфология. 1997. № 3. С. 3 – 7.
41. Лохтин В.М. О механизме речного русла. СПб.: Типография министерства путей сообщения, 1897. 77с. (Лохтин В. М. О механизме речного русла//Вопросы гидротехники свободных рек. М.: Речиздат, 1948. С. 23–59).
42. Львович М.И. Опыт классификации рек России // Труды ГГИ. Вып. 6. 1938 а. С 58-105.
43. Львовская Е.А. Ретроспективный анализ, современное состояние и оценка возможных изменений русловых процессов на больших реках севера ЕТР Автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. – М.: Изд-во МГУ. 2016. 30 с.
44. Львовская Е.А., Чалов Р.С. Гидролого-морфологический анализ разветвленного русла р. Печора // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. География. – 2015. – № 1. – С. 78–86.
45. Магрицкий Д.В. Факторы и закономерности многолетних изменений стока воды, взвешенных наносов и теплоты нижней Лены и Вилюя // Вест. Моск. Ун-та. Сер. 5. География. 2015. №6. С 85-95.
46. Маккавеев Н.И. Регрессивные переформирования речных островов // Метеорология и гидрология. 1948. №4. С. 44-50.
47. Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 347 с.
48. Маккавеев Н.И. Русловой режим рек и трассирование прорезей. – М.: Речиздат, 1949. – 201 с.
49. Маккавеев Н.И., Чалов Р.С. Русловые процессы. М.: Изд-во МГУ, 1986. 264 с.
50. Матвеев Б.В. Морфология и геолого-геоморфологические факторы развития врезанных и свободных излучин: автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 25.0027. – М.: Изд-во МГУ, 1985б. – 20 с.
51. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Выпуск 24. Якутская АССР. Книга 2. Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 387 с.
52. Никитина Н. А., Чалов Р. С. Узлы слияния рек и их морфологические типы // Геоморфология. 1988. № 4. С. 64 – 70.
53. Павлов И.Н. Морфология русел рек равнинной части Алтайского края. // Геоморфология 1994. №3. С. 78-85.

54. Поляков Б.В. Характеристика интенсивности эрозии по данным о стоке наносов рек Европейской территории СССР // Тр. 1-го совещания по регулированию стока. М. — Л.: Изд-во АН СССР, 1946. С. 81–97.
55. Попов И.В. Деформации речных русел и гидротехническое строительство. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 328 с.
56. Проскуряков А.К. В.М. Лохтин и Н.С. Лелявский — основатели учения о формировании русла, Л.: Гидрометеиздат, 1951.
57. Ржаницын Н.А. Руслоформирующие процессы рек. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 264 с.
58. Россинский К.И., Кузьмин И.А. Закономерности формирования речных русел // Русловые процессы. М.: Изд-во АН СССР, 1958. С. 5-14.
59. Рулева С. Н, Парамзин А. Н. О формировании параллельно-рукавного русла верхней Оби // Десятое межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. Науч. сообщ. Вологда. 1995. С. 96-97.
60. Рулёва С.Н. Морфология и динамика русла верхней и средней Оби и влияние на них гидротехнических мероприятий. Автореф. дисс. канд. геогр. наук. М.: МГУ. 1988.
61. Русловой режим рек Северной Евразии (в пределах бывшего СССР) / Под ред. Р.С. Чалова — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1994. — 386 с.
62. Русловой режим средней и нижней Лены. М.: Деп. ВИНТИ № 2224-76, 1976. 184 с.
63. Русловые процессы и водные пути на реках Обского бассейна. Новосибирск: РИПЭЛ плюс, 2001. 300 с.
64. Русловые процессы на реках Алтайского края. Масштаб 1: 1000000. ГУГК СССР, 1991. 1 л.
65. Русловые процессы на реках Алтайского региона. М.; МГУ, 1996. 243 с.
66. Русловые процессы на реках СССР. Масштаб 1:4 000 000. — М.: ГУГК СССР, 1990. — 4 л.
67. Сидорчук А.Ю. Морфология, динамика и структура речного русла: автореф. дис....докт. геогр. наук: 11.00.07. — М.: Изд-во МГУ, 1992. — 58 с.
68. Смирнова В.Г. Гидролого-морфологический анализ разветвленных русел рек Алтайского региона: автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.27. — Иркутск: ИГ СО РАН, 2002. — 20 с.

69. Сурков В. В. Динамика пойменных ландшафтов верхней и средней Оби. М.: Географический факультет МГУ. 1999. 254 с.
70. Сурков В. В. Чалов Р.С. Сезонная и многолетняя цикличность развития перекатов верхней и средней Оби // География и природные ресурсы. 2002. №4. С. 79-85.
71. Сурков В. В. Эволюция поймы Верхней Оби в условиях сокращения продолжительности ее затопления // География и природные ресурсы. 1998. №2. С. 102-109.
72. Сурков В.В. Влияние дноуглубительных работ на эволюцию разветвленных участков р. Оби // Геоморфология. – 2001. – №4. – С. 37–45.
73. Тананаев Н.И. Сезонное и многолетнее промерзание русел рек криолитозоны и его влияние на русловые деформации (на примере средней Лены) // Эрозионные, русловые процессы и проблемы гидроэкологии. М.: Географический факультет МГУ. 2004.
74. Тананаев Н.И. Сток наносов и русловые процессы на реках криолитозоны: Автореф. Дисс. канд. Геогр. Наук. М.: Изд-во МГУ, 2007, 27 с.
75. Тарбеева А. М. Рельеф речных островов и особенности их развития (на примере средней Оби). // Геоморфология. 2005. №3. С. 111-121.
76. Тарбеева А. М. Формирование и эволюция островов в русле Оби // Эрозионные, русловые процессы и проблемы гидроэкологии. М.: Изд-во МГУ. 2004. С. 202-208.
77. Чалов Р. С. Временная трансформация морфодинамических типов русел больших равнинных рек // Вестник Московского университета. Серия 5: География. — 2018. № 3. С. 3–13.
78. Чалов Р. С. О морфологическом разнообразии и типизации русел рек, разветвлённых на рукава // Геоморфология. 2019. № 3. С. 3–18.
79. Чалов Р.С. Эффективность прогноза переформирований сложноразветвленного русла и его практическое значение // Вест. Моск. Ун-та. Сер. 5. География. 1981 С. 36–40.
80. Чалов Р. С. Русловые процессы (русловедение). М.: ИНФРА-М, 2017. 569 с.
81. Чалов Р. С. Сложноразветвленные русла равнинных рек: условия формирования, морфология и деформации // Водные ресурсы. 2001. Т. 23. №2. С.166-171.

82. Чалов Р. С., Жмыхова Т. В. Прирусловые отмели верхней Оби: типизация, морфология и гидролого-морфологический анализ. // География и природные ресурсы. 2014. №4. С. 63-72.
83. Чалов Р. С., Завадский А. С., Ботавин Д. В., Головлёв П. П., Морозова Е. А., Сурков В. В. Покровско-Якутский водный узел на р. Лене: современные деформации и управление русловыми процессами // Изв. РАН. Сер. Географ. 2019. №6. С. 83-96.
84. Чалов Р. С., Завадский А. С., Рулева С. Н., Кирик О. М., Прокопьев В. П., Андросов И. М., Сахаров А. И. Морфология, деформации, временные изменения русла р. Лены и их влияние на хозяйственную инфраструктуру в районе г. Якутска // Геоморфология. 2016. №3. С. 22-35.
85. Чалов Р. С., Кирик О. М. Ленские "разбои": ретроспективный анализ переформирований, прогнозные оценки и регулирование русла // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 19. — Географический факультет МГУ Москва, 2015. — С. 294–338.
86. Чалов Р. С., Рулева С. Н., Камышев А. А., Беркович К. М., Завадский А. С., Михайлова Н. М. Верхняя и средняя Обь: русловые процессы и оценка условий управления ими // Эрозия почв и русловые процессы. М.: Географ. ф-т МГУ, 2018. Вып. 20. С. 149—195.
87. Чалов Р. С., Сурков В. В., Жмыхова Т. В. Прирусловые отмели, как формы руслового рельефа, промежуточные между меженным руслом и поймой реки. // Геоморфология. 2016. №1. С. 18-29.
88. Чалов Р. С., Чалов С. Р. Структурные уровни и морфодинамическая классификация русловых разветвлений // Водные ресурсы. 2020. Т. 47, № 3. С. 259–271.
89. Чалов Р.С. Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во МГУ, 1979. 232 с.
90. Чалов Р.С. Общее и географическое русловедение. М.: Изд-во МГУ, 1997. 112 с.
91. Чалов Р.С. Показатели устойчивости русел, их использование для оценки интенсивности русловых деформаций и пути их совершенствования // Динамика русловых потоков. – Л.: Изд-во ЛПИ, 1983. – С. 46–53.
92. Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 1. Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 608 с.

93. Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 2. Морфодинамика речных русел. М.: КРАСАНД, 2011. 960 с.
94. Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 3. Антропогенные воздействия, опасные проявления и управление русловыми процессами. М.: КРАСАНД, 2019. 640 с.
95. Чалов Р.С. Руслоформирующие расходы воды // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. География. – 2006. – № 1. – С. 11–19.
96. Чалов Р.С. Типы русловых процессов и принципы морфодинамической классификации речных русел // Геоморфология. 1996. № 1. С. 25–36.
97. Чалов Р.С., Алабян А.М., Иванов В.В., Лодина Р.В., Панин А.В. Морфодинамика равнинных рек. М.: ГЕОС, 1998. 288 с.
98. Чалов Р.С., Беркович К.М., Рулева С.Н., Завадский А.С., Головлев П.П., Голубцов Г.Б. Формирование, эволюция и временная трансформация параллельно-рукавных разветвлений речных русел // Географический вестник. 2020, № 4 (55). С. 110–125.
99. Чалов Р.С., Завадский А.С., Ботавин Д.В., Крыленко И.Н., Михайлова Н.М., Павлушкин С.В., Куракова А.А., Голубцов Г.Б., Семаков В.А. Колпашевские перекаты в Канеровском разветвлении р. Обь: деформации, прогнозные оценки и регулирование русла // Речной транспорт (XXI век). 2022. №2. С. 38–43.
100. Чалов Р.С., Завадский А.С., Панин А.В. Речные излуины. М.: Изд-во МГУ, 2004. 371 с.
101. Чалов Р.С., Завадский А.С., Рулева С.Н. Параллельно-рукавные разветвления речных русел; условия формирования, морфология и динамика // Водные ресурсы. 2008. Т. 35. №2. С. 166–174.
102. Чалов Р.С., Завадский А.С., Рулева С.Н., Кирик О.М., Прокопьев В.П., Андросов И.М., Сахаров А.И. Морфология, деформации, временные изменения русла р. Лены и их влияние на хозяйственную инфраструктуру в районе г.Якутска. В журнале Геоморфология, издательство Наука (М.), № 3, с. 22–35.
103. Чалов Р.С., Зайцев А.А., Чернов А.В., Лодина Р.С., Беркович К.М., Алексеевский Н.И., Евстигнеев В.М. Русловой режим рек Северной Евразии (в пределах бывшего СССР). М.: Географ. ф-т МГУ Москва, 1994. 336 с.
104. Чалов Р.С., Камышев А.А., Завадский А.С., Куракова А.А. Морфодинамика и гидролого-морфологическая характеристика русла средней Оби на широтном участке // География и природные ресурсы. 2021. № 2. С. 92–102.

105. Чалов Р.С., Камышев А.А., Куракова А.А., Завадский А.С. Особенности рассредоточения стока воды и взвешенных наносов в половодье в раздвоенном русле нижней Оби // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. № 1. С. 23–33.
106. Чалов Р.С., Кирик О.М., Ильясов А.К., Ботавин Д.В. Временная трансформация сложноразветвленного русла крупнейшей реки (на примере приалданского участка р. Лены) // Геоморфология. 2014. № 1. С. 92–103.
107. Чалов Р.С., Кирик О.М., Ильясов А.К., Ботавин Д.В. Многолетние направленные и периодические деформации Белогорских перекатов на Лене и временная трансформация подходов к их выправлению. Речной транспорт (XXI век), (2):70–74, 2014.
108. Чалов Р.С., Кирик О.М., Ильясов А.К., Ботавин Д.В. Якутский водный узел на реке Лене - проблемы русловых процессов: история, современность, перспективы, возможности управления. Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2012. № 3. С. 44-56.
109. Чалов Р.С., Кирик О.М., Ильясов А.К., Ботавин Д.В., Броницкий В.И., Кыллахский «разбой» и Олекминские перекаты на р.Лене: русловые процессы и путевые работы // Речной транспорт (XXI век). 2012. №3.
110. Чалов Р.С., Лю Шугуан, Алексеевский Н.И. Сток наносов и русловые процессы на больших реках России и Китая (Северная Двина, Обь, Лена, Хуанхэ, Янцзы). – М.: МГУ, 2000. – 212 с.
111. Чалов Р.С., Плескевич Е.М., Баула В.А. Русловые процессы и водные пути на реках Обского бассейна. Новосибирск: РИПЭЛ плюс, 2001. 300 с.
112. Чалов Р.С., Рулёва С.Н., Михайлова Н.М. Оценка морфодинамической сложности русла большой реки при планировании водохозяйственных мероприятий (на примере Оби) // География и природные ресурсы. 2016. №. 1. С. 29-37.
113. Чалов Р.С., Сурков В.В., Рулёва С.Н., Беликов В.В., Завадский А.С., Бондарев В.П., Ильясов А.К. Русловые процессы на р. Оби в районе г. Колпашево, размыв города, компьютерное моделирование потока и обоснование оптимального варианта защитных мероприятий // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 18. М.: Геогр. ф-т МГУ, 2012. С. 205–243.
114. Чалов Р.С., Чалова А.С., Голубцов Г.Б. О терминологии и классификации разветвлений равнинных рек // Геоморфология. 2021. № 3. С. 48-63.
115. Чалов Р.С., Чернов А.В. районирование территории России по экологическому состоянию русел и пойм // Проблемы оценки экологической

- напряженности территории России: факторы, районирование. М.: Изд-во МГУ, 1993. С. 66-72.
116. Чалов Р.С., Чернов А.В., Беркович К.М., Михайлова Н.М. География опасных проявлений русловых процессов на реках России // Известия Русского географического общества. 2017. Т. 149, № 4. С. 13–32.
117. Чалов Р.С., Завадский А.С., Камышев А.А., Куракова А.А., Михайлова Н.М., Рулева С.Н. Гидролого-морфологическая характеристика и перестроения разветвленного русла нижней Оби (в пределах Ямало-Ненецкого АО) // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2021. Т. 85, № 4. С. 539-553.
118. Чалов С.Р. Гидрологические функции русловых разветвлений. Автореф. Дис. Канд. Геогр. Наук. М. 2007. 24 с.
119. Чалов Р.С. Параметризация русловых процессов для прогнозных оценок и диагностики опасных проявлений // Водные ресурсы. 2017. Т. 44, № 5. С. 551–562.
120. Чернов А.В. Геоморфология пойм равнинных рек. М.: Изд-во МГУ. 1983. 198 с.
121. Чернов А.В. География и геоэкология русел и пойм рек Северной Евразии. М.: Крона, 2010. 684 с.
122. Чернов А.В. Особенности морфологии поймы средней Лены, возникшие в результате врезания реки и увеличения ее водности. М.: ВИНТИ, 1975, Деп. № 236-B75. 7 с.
123. Чистяков Г.Е. Водные ресурсы рек Якутии. М.: Наука, 1964. 256 с.
124. Чистяков Г.Е. Русловые процессы на реке Лене в районе г. Якутска. В кн.: «Исследование вечной мерзлоты в Якутской республике», вып. 3, М., из-во АН СССР, 1952.
125. Щукин И.С. Общая геоморфология. Т. 1. М.: Изд-во МГУ, 1960. 616 с.
126. Эрозионно-русловые системы / Под ред. Р. С. Чалова, В. Н. Голосова, А. Ю. Сидорчука. М.: ИНФРА-М, 2017. 702 с.
127. Baker V.R. Stream-channel response to floods with examples from central Texas // Geol. Soc. Am. Bull. Vol. 88. – 1977. – №8. – P. 1057–1071.
128. Carson M.A. The meandering-braided river threshold: a reappraisal // J.Hydrol. Vol. 73. – 1984. – P. 315–334.

129. Constantine C.R., Dunne T., Hanson G.J. Examining the physical meaning of the bank erosion coefficient used in meander migration modeling // *Geomorphology*. 2009. № 106. P. 242-252.
130. Cotard F., Dupeyrat L., Gautier E., Careg-Gailhardis E. Fluvial thermal erosion investigation along a rapidly eroding river bank: application to the Lena river (Central Siberia) // *Earth Surface and Landforms*. 2003. V. 28. № 12. P. 1349–1359.
131. Egozi R., Ashmore P. Experimental analysis of braided channel pattern response to increased discharge. // *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 2009. P. 941 – 962.
132. Evrard O., Poulenard J., Némery J., Ayrault S., Gratiot N., Duvert, C., Prat C., Lefèvre I., Bonté P., Esteves M. Tracing sediment sources in a tropical highland catchment of central Mexico by using conventional and alternative fingerprinting methods. // *Hydrol. Process*. 2013 V. 27. P. 911–922.
133. Gautier E., Brunstein D., Cotard F., Lodina R. Fluvial dynamics in a deep permafrost zone – the case of the middle Lena river (Central Siberia) // *Proceeding of the 8th Intern. conf. on permafrost*. Zurich, Switzerland. 2003. P. 271–275.
134. Gilbert G.K. The transportation of debris by running water // *US Geol. Surv. Prof. Pap.* 86. 1914. 263 p.
135. Knighton D. *Fluvial Forms and Processes*. 2014. 400 p.
136. Komar P.D. Shape of streamlined island on Earth and Mars: Experiments and analyses of the minimum-drag form // *Geology*. – 1983. – № 11. – P. 651–654.
137. Leopold L.V., Wolman M.G. River channel patterns – braided, meandering and straight // *US Geol. Surv. Prof. Pap.* 282-B. 1957. P. 1-85.
138. Magritskii D.V. Anthropogenic impact on the runoff of Russian rivers emptying into the Arctic Ocean. *Water Resources*. 35(1): 2008. 1–14.
139. Merritt M., Wohl E.E. Downstream hydraulic geometry and channel adjustment during a flood along an ephemeral, arid-region drainage // *Geomorphology*. 2003. 165-180 pp.
140. Nicholas A.P. Modelling the continuum of river channel patterns // *Earth Surf. Process. Landforms*. 2013. V. 438, Iss. 170, P. 1187 – 1196.
141. Rosgen D.L. A classification of natural rivers // *Catena*. 1994. 22. P. 169-199.
142. Rutherford I. Some human impacts on Australian stream channel morphology // *River Management: The Australasian Experience*. Chichester, John Wiley & Sons, 2000. P. 2-52.

143. Schumm S.A. Evolution and response of the fluvial system, sedimentologic implications // Soc. Econ. Paleontol. Mineral. Spec. Publ. 1981. № 31. P. 19-29.
144. Schumm S.A. Meander wavelength of alluvial rivers // Science. Vol. 157. – 1967. – № 3796. – P. 1549–1552.
145. Schumm S.A. Patterns of alluvial rivers // Ann. Rev. Earth Planet. Sci. 1985. № 13. P. 5-27.
146. Schumm S.A. The fluvial system. 1977. 338 p.
147. Schumm S.A., Khan H.R. Experimental study of channel patterns // Geol. Soc. Am. Bull. 1972. Vol. 83. № 6. P. 1755-1770.
148. Schuurman F., Kleinhans M.G. Bar dynamics and bifurcation evolution in a modelled braided sand-bed river. // Earth Surf. Process. Landforms. 2015. V. 40. Iss. 10. P. 1318 – 1333.
149. Yang D., Kane D., Hinzman L., Zhang X., Zhang T., Ye H. Siberian Lena river hydrologic and recent change // J. of Geophys. Res. 2002. V. 107 (D 23). P. 4694–4703.

Использованы также следующие материалы:

- Лоцманские карты на участок верхней Оби (слияние Бии и Катунь – устье р. Чарыш) и средней и нижней Лены (пгт Мохсогोलлох – с. Жиганск) различных годов издания (1957, 1958, 1982, 2000, 2015 с корректурой)
- Топографические карты ГУГК (М. 1:50000), ГГЦ (М. 1:2000000).
- Отчет НИЛаборатории эрозии почв и русловых процессов имени Н. И. Маккавеева «Комплексные русловые исследования р. Лены на участке Якутского водохозяйственного и водотранспортного узла (от мыса Табага до мыса Кангалассы) с целью обеспечения судоходства и безопасного функционирования объектов жизнеобеспечения г. Якутска и прилегающих территорий с учетом техногенных воздействий при развитии промышленности, коммунального хозяйства и путей сообщения» М.: МГУ Географический факультет, 2016. 450 с. (Этапы 1-4).
- Отчет «Разветвления русел равнинных рек (многоорукавные русла) гидролого-морфодинамический анализ, гидрологические функции, временная трансформация, методы управления для обеспечения гидроэкологической безопасности» М.: МГУ Географический факультет, 2020. 150 с.

- Отчет «Разветвления русел равнинных рек (многоорукавные русла); гидролого-морфодинамический анализ, гидрологические функции, временная трансформация, методы управления для обеспечения гидроэкологической безопасности» М.: МГУ Географический факультет, 2018. 60 с. Этап 1.
- Отчет «Распределение стока в разветвлениях нижней Лены (Монастырские, Черпальские-Рысьи, Сахам) на спаде половодья (по измерениям 3-5 июля 2021 г.)» М.: МГУ Географический факультет, 2021. 12 с.